



Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation

Julien Chamoin

► To cite this version:

Julien Chamoin. Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation. Autre. INSA de Rennes, 2013. Français. NNT : 2013ISAR0016 . tel-00934732

HAL Id: tel-00934732

<https://theses.hal.science/tel-00934732>

Submitted on 22 Jan 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse



THESE INSA Rennes
sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne
pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'INSA DE RENNES
Spécialité : Génie Civil

présentée par
Julien Chamoin

ECOLE DOCTORALE : SDLM
LABORATOIRE : LGCGM

**Optimisation des
propriétés
(physiques, hydriques et
mécaniques)
de bétons de chanvre
par la maîtrise de la
formulation.**

Thèse soutenue le 04 juillet 2013

Jacques Miriel

Professeur, Université Rennes 1 / Directeur de thèse

devant le jury composé de :

Patrick Salagnac

Professeur, Université La Rochelle / Président du jury, rapporteur

Patrick Glouannec

Professeur, Université Bretagne Sud / Rapporteur

Laurent Arnaud

Docteur HDR, directeur ENSAM Cluny / Examineur

Christophe Lanos

Professeur, Université Rennes 1 / Examineur

Florence Collet

Maître de Conférences, Université Rennes 1 / Co-encadrant de thèse

Sylvie Prétot

Maître de Conférences, Université Rennes 1 / Co-encadrant de thèse

Remerciements

Cette thèse a été menée dans le cadre du projet ANR « BETONCHANVRE » au sein de l'équipe « Matériaux et Thermo-Rhéologie » du Laboratoire Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM) de Rennes. Mes premiers remerciements vont donc naturellement vers l'ensemble des membres qui compose cette équipe et ce laboratoire.

Je tiens également à remercier les membres du jury et en particulier les rapporteurs Mr SALAGNAC Patrick et Mr GLOUANNEC Patrick pour leurs remarques pertinentes qui m'ont permis d'améliorer mon manuscrit. Je dis également merci à Mr ARNAUD Laurent pour avoir accepté d'être examinateur.

Cette aventure qui m'a fait travailler durant plus de 3 ans n'aurait jamais pu voir le jour si Mme COLLET Florence et Mme PRETOT Sylvie ne m'avaient pas proposé un stage de recherche en master 2 sur le sujet durant l'année universitaire 2007-2008 et qui a débouché sur cette thèse. Je tiens donc à les remercier. Je remercie également Mr MIRIEL Jacques, mon directeur de thèse, pour m'avoir fait confiance durant toutes ces années et pour m'avoir proposé de faire cette thèse.

Mon travail expérimental n'aurait pas pu être réalisé sans l'ensemble des personnes qui m'ont entouré pour mener à bien mes projets. Je remercie donc les techniciens retraités ou non Mr GENOUEL Daniel, Mr TRINQUART Michel et Mr BIANEIS Guy qui m'ont aidé à réaliser mes échantillons, mes moules, etc ...

Durant ma thèse j'ai eu la chance d'enseigner au sein de l'IUT Génie Civil de Rennes. Je tiens donc à remercier l'ensemble des enseignants, membres du personnel de l'IUT et étudiants pour leurs aides, écoutes, bonne humeur. Je remercie plus particulièrement Mr BARRERE Olivier pour m'avoir fait confiance et m'avoir permis d'enseigner, Mme SIMON Pascale pour ses écoutes et aides, Mr LIONEL Mathieu pour l'ensemble de nos discussions.

Tout à l'heure, je comparais ma thèse à une aventure et comme dans toute aventure, si on n'est pas bien entouré, aidé il est très compliqué d'arriver au bout. Je tiens à remercier Mr LANOS Christophe et Mme PRETOT Sylvie pour leur aide, leurs réponses ainsi que leurs disponibilités. Je veux dire un GRAND merci à Mme COLLET Florence car sans elle cette thèse ne serait jamais allée à son terme. Merci à elle pour ses exceptionnels soutiens et aides qu'elle m'a procurés durant toute la durée de ma thèse.

Je remercie également mes ami(e)s et plus particulièrement Mlle CARREE Typhaine, Mr STRUBHARD Christophe ainsi que l'équipe des Séniors Masculin du club du Rennes Métropole Handball pour toutes ces soirées qui m'ont permis de me changer les idées et de regonfler mes batteries.

Je ne pourrais pas faire de bons remerciements si je ne remerciais pas ma famille qui m'a été d'un très grand soutien moral et physique. Je remercie mon père et ma mère pour m'avoir soutenu durant l'ensemble de mes études et durant ma thèse. Merci à mes deux frères pour m'avoir changé les idées et m'avoir faire rire.

Enfin, je remercie Marie, Ma copine, qui a été la personne qui m'a permis d'aller au terme de mon aventure. Merci pour son soutien inconditionnel dans les moments durs, son écoute, ses conseils. Merci !

Sommaire

SOMMAIRE	1
NOMENCLATURE	6
INTRODUCTION	9
CHAPITRE 1 ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES.....	13
1.1 Contexte et enjeux	14
1.1.1 Le secteur du bâtiment et l'environnement	14
1.1.2 De la qualité environnementale des bâtiments à l'utilisation des matériaux biosourcés	15
1.2 Le béton de chanvre et ses constituants	17
1.2.1 Le Chanvre	17
a. Généralités	17
b. Fibre	19
c. Chènevotte	20
1.2.2 Le liant	23
a. Les chaux	24
b. Le ciment portland	26
c. Liant pouzzolanique	27
d. Les liants sulfatiques	28
e. Caractéristiques des liants	28
1.3 Caractéristiques du béton de chanvre	30
1.3.1 Généralités	30
1.3.2 Caractéristiques physiques	30
a. Milieux poreux : masse volumique et porosité	30
b. Volume élémentaire représentatif	33
c. Capacité d'absorption d'eau	35
1.3.3 Caractéristiques hydriques	35
a. Stockage de l'humidité : isotherme de sorption	35
b. Capacité de transfert	40
1.3.4 Caractéristiques thermiques	43
1.3.5 Caractéristiques mécaniques	44
a. Caractéristiques requises	44
b. Caractéristiques des liants	45
c. Caractéristiques des bétons de chanvre en lien avec la formulation	45
CHAPITRE 2 MATERIAUX ETUDIES	49
2.1 Matières premières	50
2.1.1 Généralités	50
2.1.2 Liants	50
a. Tradical PF70	50

b.	Tradichanvre.....	51
c.	Microcem 7.....	51
2.1.3	Chènevottes	53
2.2	Matériaux produits par les partenaires industriels	55
2.2.1	Béton de chanvre projeté (Partenaire SI2C)	55
a.	Procédé de mise en œuvre	55
b.	Formulations.....	57
2.2.2	Blocs préfabriqués (Partenaire Easy-Chanvre)	57
a.	Procédé de mise en œuvre	57
b.	Formulations.....	59
2.2.3	Blocs Moulés – Chanvre fibré (Partenaire Terrachanvre)	60
a.	Procédé de mise en œuvre	60
b.	Formulations.....	60
2.2.4	Enduits	60
a.	Procédé de mise en œuvre	60
b.	Formulations.....	61
2.3	Matériaux développés en laboratoire	62
2.3.1	Procédé de mise en œuvre	62
2.3.2	Formulations avec variantes de liant	62
2.3.3	Formulations avec variantes de chènervottes.....	63
a.	Compositions	63
b.	Traitement des chènervottes	63
2.3.4	Bilan	69
CHAPITRE 3	METHODES EXPERIMENTALES ET ANALYSES	70
3.1	Préparation des échantillons.....	71
3.1.1	Stabilisation et séchage	71
3.1.2	Découpage et sélection des échantillons	72
3.2	Propriétés physiques	73
3.2.1	Masse volumique apparente (23°C / 50% HR)	73
3.2.2	Teneur en eau de saturation et porosité ouverte ...	74
3.2.3	Masse volumique réelle et porosité totale	74
3.3	Propriétés hydriques	75
3.3.1	Sorption.....	75
a.	Banc expérimental	75
b.	Modèle cinétique	75
c.	Modélisation des isothermes	76
d.	Surface spécifique des matériaux	80

3.3.2	Perméabilité à la vapeur	80
a.	Protocole d'essai.....	80
b.	Modélisation de l'évolution de la perméabilité à la vapeur avec l'humidité	82
3.3.3	Diffusivité hydrique.....	82
a.	Couplage des isothermes de sorption et de la perméabilité à la vapeur.....	82
3.4	Propriétés mécaniques	84
3.5	Carbonatation et vieillissement.....	87
CHAPITRE 4	RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	88
4.1	Formulations et analyses	89
4.2	Formulations de bétons de chanvre de type « Mur » - « Référence »	90
4.2.1	Séchage et masse volumique apparente	90
a.	Cinétique de séchage	90
b.	Pourcentage de perte massique.....	91
c.	Taux d'évaporation	92
d.	Evolution de la masse volumique apparente	92
4.2.2	Propriétés physiques	93
a.	Masse volumique apparente	93
b.	Autres caractéristiques physiques.....	94
4.2.3	Propriétés hydriques	94
a.	Stockage : Isothermes de sorption	94
b.	Perméabilité à la vapeur	104
c.	Diffusivité.....	105
4.2.4	Propriétés Mécaniques.....	106
4.3	Formulations de bétons de chanvre de type « Variante : Taux de compactage »	108
4.3.1	Séchage et propriétés physiques	108
4.3.2	Propriétés hydriques	109
a.	Stockage : Isothermes de sorption	109
b.	Transfert : Perméabilité à la vapeur et diffusivité hydrique	111
4.4	Formulations de bétons de chanvre de type « Variante : Taux de liant ».....	113
4.4.1	Séchage et Propriétés physiques	113
4.4.2	Propriétés hydriques	114
a.	Stockage : Isothermes de sorption	114
b.	Transfert : Perméabilité à la vapeur et diffusivité hydrique	116

4.5	Formulations de bétons de chanvre de type « Variante : Type de liant »	118
4.5.1	Séchage et Propriétés physiques	118
4.5.2	Propriétés hydriques	119
a.	Stockage : Isothermes de sorption	119
b.	Transfert : Perméabilité à la vapeur et diffusivité hydrique	121
4.5.3	Propriétés Mécaniques	123
4.6	Formulations de bétons de chanvre de type « Variante : Type de Chanvre »	127
4.6.1	Séchage et propriétés physiques	127
4.6.2	Propriétés hydriques	129
a.	Stockage : Isothermes de sorption	129
b.	Transfert : Perméabilité à la vapeur et diffusivité hydrique	131
4.6.3	Propriétés Mécaniques	133
4.7	Formulations de types « Liants et enduits »	136
4.7.1	Séchage et Propriétés physiques	136
4.7.2	Propriétés hydriques	137
a.	Stockage : Isothermes de sorption	137
b.	Transfert : Perméabilité à la vapeur et diffusivité hydrique	140
4.8	Durabilité des bétons de chanvre	144
4.8.1	Propriétés physiques	144
4.8.2	Propriétés hydriques	144
a.	Stockage : Isothermes de sorption	144
b.	Transfert : Perméabilité à la vapeur et diffusivité hydrique	145
4.8.3	Propriétés mécaniques.....	147
CONCLUSION		152
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		158
ANNEXES.....		166

Nomenclature

Nomenclature

a	Paramètre d'ajustement	[-]
b	Paramètre d'ajustement	[-]
c	Paramètre d'ajustement	[-]
D_v	Coefficient de diffusion de vapeur dans le milieu poreux	$[m^2.s^{-1}]$
d	Diamètre	[m]
d_p	Diamètre des pores	[m]
D_u	Coefficient de diffusion hydrique dans le milieu poreux	$[m^2.s^{-1}]$
D_0	Coefficient de diffusion de vapeur dans l'air libre	$[m^2.s^{-1}]$
$E_{apparent}$	Module de Young Apparent	[kPa]
ϵ_{smax}	Déformation pour la contrainte maximale	$[m.m^{-1}]$
e	Epaisseur	[m]
E_l	Chaleur molaire d'adsorption	$[J.mol^{-1}]$
ϵ	Déformation	$[mm.mm^{-1}]$
$E_{élastique}$	Module de Young élastique	[kPa]
E	Module de youg	[MPa]
γ_{sl}	Tension superficielle entre le solide et le liquide	$[mN.m^{-1}]$
G	Taux de variation de masse	$[m.s^{-1}]$
γ_{lv}	Tension superficielle entre le liquide et l'air	$[mN.m^{-1}]$
g_v	Densité de flux massique de vapeur	$[kg.m^{-2}.s^{-1}]$
γ_{sv}	Tension superficielle entre le solide et l'air	$[mN.m^{-1}]$
h	Hauteur	[m]
HR	Humidité relative	[%]
K	Constante de Boltzmann	[-]
Kn	Nombre de Knudsen	[-]
l	Longueur	[m]
m_{sat}	Masse de l'échantillon saturé	[kg]
m	Masse Totale	[kg]
m_s	Masse Solide	[kg]
m_l	Masse Liquide	[kg]
m_g	Masse Gaz	[kg]
m_v	Facteur de résistance à la vapeur d'eau	[-]
m_0	Masse de l'échantillon sec	[kg]
n	Porosité Totale	[%]
n_0	Porosité ouverte	[%]
N	Nombre d'Avogadro	[-]
π_a	Perméabilité à la vapeur de l'air	$[2.10^{-10}.kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}]$
P_{vs}	Pression de vapeur saturante	[Pa]

Nomenclature

π	Perméabilité à la vapeur	$[\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}]$
P_v	Pression de vapeur [Pa]	
P	Pression totale [Pa]	
θ	Angle de raccordement entre le liquide et le solide	$[\text{°}]$
ρ_0	Masse Volumique Réelle	$[\text{kg.m}^{-3}]$
r	Rayon [m]	
R	Constante des gaz parfaits	$[\text{J.mol}^{-1}]$
ρ_{app}	Masse Volumique Apparente	$[\text{kg.m}^{-3}]$
σ	Contrainte [MPa]	
$\sigma_{e15\%}$	Contrainte pour une déformation de 15%	[kPa]
S_m	Surface Spécifique massique	$[\text{m}^2.\text{g}^{-1}]$
σ_{max}	Contrainte Maximum [MPa]	
t	Temps [s]	
T	Température Absolue [K]	
u	Teneur en eau volumique	$[\%]$
V_g	Volume Gaz [m ³]	
V_l	Volume Liquide [m ³]	
V_s	Volume Solide [m ³]	
V	Volume Apparent [m ³]	
V_p	Volume des pores [m ³]	
W	Perméance $[\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}]$	
ω	Teneur en eau massique du matériau	$[\%]$
ω_m	Teneur en eau massique monomoléculaire	$[\%]$
ω_i	Teneur en eau initiale	$[\%]$
ω_{sat}	Teneur en eau massique de saturation	$[\%]$
ω_i	Teneur en eau massique initiale	$[\%]$

Introduction

Le secteur du bâtiment affecte fortement l'environnement à travers les consommations de ressources naturelles et d'énergie. Ces consommations s'accompagnent, ensuite, d'émissions de déchets et de polluants agissant sur le climat global, local et intérieur. Dans ce contexte, il est nécessaire, entre autre, que les constructions soient économes en énergie et aient recours à des matériaux à faibles impacts environnementaux. En France, à l'issue du Grenelle de l'environnement (automne 2007), différentes voies ont été définies pour favoriser cette mutation.

La réglementation thermique se voit ainsi renforcer progressivement afin de limiter les besoins énergétiques des bâtiments et des labels sont créés afin de favoriser l'innovation technologique. Ainsi, les exigences de la réglementation thermique (RT 2012), et le développement des bâtiments passifs, conduisent à la mise en œuvre d'enveloppes de plus en plus étanches à l'air et très performantes en terme d'isolation thermique. Ceci permet, certes, de limiter les besoins énergétiques en période de chauffage mais conduit également dans certains cas à de l'inconfort en mi-saison et en été (effet enveloppes « Thermos »).

En parallèle, des mesures incitatives sont proposées en faveur des matériaux bio-sourcés afin que ceux-ci prennent une place de plus en plus importante dans la composition des matériaux de construction. L'objectif fixé à l'issue du Grenelle est d'atteindre 10% de matériaux bio-sourcés dans le bâtiment, hors bois d'œuvre, à l'horizon 2020. Parmi ces matériaux, le béton de chanvre apparaît comme une solution pertinente. Ce matériau non porteur est utilisé comme matériau de remplissage associé à une ossature bois et est utilisé pour différentes applications (Mur, Dalle, Toit). Ses principales qualités reposent sur son faible impact environnemental et sur son comportement hygrothermique limitant les besoins énergétiques du bâtiment tout en assurant un bon niveau de confort ressenti [COL, 04], [CER, 05], [EVR, 08], [SAM, 08], [MAG, 10], [NGU, 10], [TRA, 10], [TRA,10-2], [AIT, 13]. L'enduit chanvre-chaux, quant à lui, est utilisé pour la réalisation d'enduit à caractère isolant.

Cette thèse est focalisée sur la compréhension du lien entre la formulation du béton de chanvre et ses propriétés en œuvre. Elle vient en appui du projet ANR « BetonChanvre » qui implique trois laboratoires (LIMATb, LGCGM et GeM) et trois partenaires industriels. La société SI2C applique le béton de chanvre par projection. La société Easy-Chanvre fabrique des blocs de béton de chanvre. La société Terrachanvre produit des granulats de chanvre (chènevotte). L'objectif principal de ce projet concerne l'optimisation de la formulation en liaison avec les process de fabrication des partenaires industriels en vue de réduire le temps de séchage et de durcissement des bétons de chanvre. Il s'agit également de quantifier l'impact des constituants et des procédés de mise en œuvre sur la cinétique de séchage et sur les performances finales du matériau. Pour ce type de matériau, les performances attendues en usage concernent les propriétés mécaniques mais surtout les propriétés thermo-hydriques (conductivité et diffusivité thermique, perméabilité à la vapeur, adsorption-désorption).

Cette thèse porte, dans un premier temps, sur la caractérisation des propriétés (physiques, hydriques, mécaniques) des matériaux de référence. Ces matériaux, réalisés

avec les partenaires industriels, sont confectionnés conformément à leur mode de mise en œuvre (projection pour SI2C et compactage moulage pour Easychanvre), différentes compositions sont considérées (mur, toiture, dalle...). Ensuite, une optimisation des formulations est proposée et les matériaux développés sont caractérisés.

La caractérisation des matériaux passe d'abord par une caractérisation physique : masse volumique apparente, masse volumique réelle, porosités (ouverte et totale). Les propriétés hydriques sont quantifiées en régime permanent via la mesure des isothermes de sorption (adsorption/désorption) et de la perméabilité à la vapeur. Les isothermes de sorption sont mesurées selon la méthode discontinue par paliers successifs d'humidité relative croissante puis décroissante. La perméabilité à la vapeur est mesurée selon la méthode de la coupelle. Différents couples d'hygrométrie sont testés pour évaluer l'évolution de la perméabilité en fonction de la teneur en eau. La diffusivité hydrique est calculée à partir de la modélisation des isothermes de sorption et de la perméabilité à la vapeur. Enfin la caractérisation des performances mécaniques repose sur l'identification de la contrainte maximale, des modules de Young (apparent et élastique) et de la contrainte résiduelle pour une déformation de 15%.

L'optimisation de la formulation des bétons de chanvre en liaison avec les process de fabrication des partenaires industriels a pour objectif de réduire la durée de séchage et/ou d'accélérer la prise au jeune âge. Le temps de séchage s'avère directement conditionné par la quantité d'eau de gâchage introduite dans la formulation pour garantir l'obtention d'une consistance du mélange compatible avec la technique de mise en œuvre du matériau (moulage, compactage et projection). Limiter la durée de séchage revient à limiter la quantité d'eau de formulation. Une réduction de cette quantité d'eau est recherchée en appliquant sur les constituants organiques du béton de chanvre un traitement imperméabilisant. Afin d'accélérer la prise au jeune âge, une modification de liant est réalisée. Une part de liant Tradical PF70 est alors substituée par du sulfate de calcium. En effet, le sulfate de calcium a pour propriété d'avoir une prise rapide et va donc accélérer le durcissement au jeune âge. C'est également un liant hydraulique qui va consommer une partie de l'eau de gâchage pour son hydratation, ce qui peut contribuer à modifier la porosité résiduelle et les caractéristiques mécaniques.

Par ailleurs, l'impact du phénomène de vieillissement/carbonatation est évalué en réalisant des essais de sorption et de perméabilité sur des échantillons entièrement carbonatés au moyen d'un incubateur CO₂.

La première partie de ce rapport présente une étude bibliographique sur le béton de chanvre et ses constituants. Ensuite, les matériaux étudiés et leur mise en œuvre sont décrits (matériaux des partenaires industriels et matériaux développés en laboratoire). Les méthodes expérimentales et d'analyse sont alors détaillées. Enfin, les résultats sont présentés. Chaque sous-chapitre détaille alors l'effet de la variation d'une caractéristique (taux de compactage, dosage en liant, type de liant, type de chanvre).

Chapitre 1

Éléments Bibliographiques

1.1 Contexte et enjeux

1.1.1 Le secteur du bâtiment et l'environnement

Durant toutes les phases de sa vie (construction, utilisation, réhabilitation et destruction), un bâtiment affecte fortement l'environnement à travers l'utilisation de ressources naturelles (roches, bois, eau...) et d'énergie (processus de construction, transport, chauffage, éclairage...)[SEY,03]. Les études de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economique) montrent que la phase d'utilisation des bâtiments représente 25 à 40 % de la consommation totale d'énergie dans les pays de l'OCDE (Figure 1.1). Cette consommation est équivalente à celle du secteur industriel.

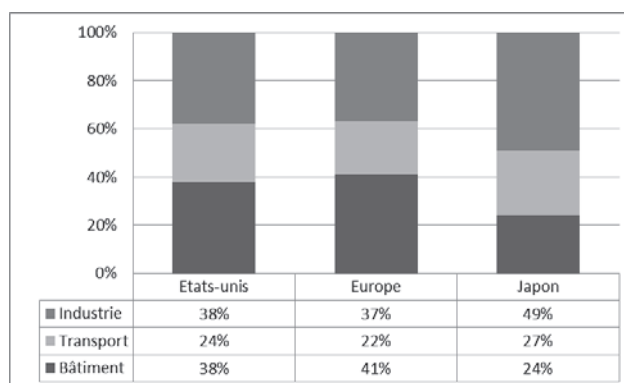


Figure 1.1 Répartition des consommations énergétiques liées à l'usage par secteur d'activité (source : OCDE, 03) (hors construction : manufacture et transport)

Le secteur du bâtiment est également responsable du tiers des émissions de dioxyde de carbone ; Ce qui en fait le deuxième plus grand émetteur de CO₂ après l'industrie [DIA, 08]. Cette émission de CO₂ contribue au réchauffement climatique car c'est un des principaux gaz à effet de serre (contribuant à plus de 50% équivalent CO₂ de l'effet de serre anthropique - Dincer [DIN, 99]).

Augmenter les performances énergétiques des bâtiments (enveloppe et équipements) doit donc permettre de réduire efficacement leur consommation d'énergie tout en assurant un bon niveau de confort et en limitant les émissions de CO₂. En outre, l'utilisation de matériaux bio-sourcés permettrait également de constituer un puits de carbone sous réserve d'une bonne gestion en fin de vie [CON, 07] [GON, 06] [GAR, 12].

Durant la période 1990-2000, une meilleure conception des bâtiments neufs en Europe a permis une diminution des consommations d'énergie des bâtiments de 0,4% alors que la population a augmenté de 0,9%. Cette amélioration est en majeure partie due à l'utilisation de matériaux et d'équipements plus performants énergétiquement ainsi qu'aux évolutions des normes et améliorations des études en amonts du projet [CON, 07]. Il conviendrait de poursuivre dans cette voie et d'étendre le principe au cas de la rénovation des bâtiments anciens.

1.1.2 De la qualité environnementale des bâtiments à l'utilisation des matériaux biosourcés

La qualité environnementale d'un bâtiment a pour objectif de maîtriser les impacts des bâtiments sur l'environnement extérieur tout en créant un environnement intérieur satisfaisant.

L'application de la qualité environnementale passe par la mise en place de méthodologies : LEED (Leadership in Energy and Environmental Design, USA), BREEAM (BRE Environmental Assessment Method, Grand-Bretagne) ou encore HQE (Haute Qualité Environnementale, France). Apparue dans les années 1990, la démarche HQE vise 14 cibles (Tableau 1.1) réparties en deux domaines : cibles sur l'environnement extérieur et cibles sur l'environnement intérieur.

Maîtriser les impacts sur l'environnement extérieur		Créer un environnement intérieur satisfaisant	
Cibles d'écoconstruction	Relation harmonieuse des bâtiments avec l'environnement immédiat	Cibles de confort	Confort hygrométrique
	Choix intégré des produits et des matériaux de construction		Confort acoustique
	Chantier à faibles nuisances		Confort visuel
Cibles d'écogestion	Gestion de l'énergie		Confort Olfactif
	Gestion de l'eau	Cibles sanitaires	Qualité sanitaire des espaces
	Gestion des déchets d'activité		Qualité sanitaire de l'air
	Gestion de l'entretien et de la maintenance		Qualité sanitaire de l'eau

Tableau 1.1 Les 14 cibles de l'association HQE [HQE, 12]

L'interaction entre les cibles conduit à une approche plus globale de la conception des bâtiments. Les matériaux utilisés pour la construction de l'enveloppe permettent de répondre à différentes cibles comme le choix intégré des matériaux de construction, la gestion de l'énergie, le confort hygrothermique... La sélection des matériaux se fait alors suivant une approche multi-critères qui conduit à un regain d'intérêt envers les éco-matériaux.

Les solutions techniques traditionnelles, utilisées pour la construction (isolation répartie ou parietale, complexe sandwich dissociant les fonctions...), méritent donc d'être réévaluées [LAN, 10] [PAC,10].

Ainsi, l'usage de matériaux d'origine naturelle tels que les végétaux (bois, paille, lin, terre, chanvre,...) et la brique de terre cuite, devient de plus en plus important. En effet, l'incorporation de matière végétale dans la formulation de produits constructifs contribue à limiter de manière non négligeable les émissions de gaz à effet de serre grâce à la consommation de CO₂ durant la culture.

Sur la base de techniques constructives parfois ancestrales, la redécouverte des bétons de végétaux présente un aspect folklorique certain [BOU, 06] qui ne doit cependant pas occulter le fait que ces matériaux possèdent des caractéristiques

hygrothermiques intéressantes en termes de besoins énergétiques et de confort hygrothermique ressenti par l'utilisateur. Notre étude est focalisée sur le béton de chanvre associant un granulats végétal (la chènevotte) à une matrice minérale. Appliqué au domaine de la construction, le béton de chanvre est utilisé depuis plusieurs années comme matériau de remplissage. Associé à une ossature bois pour réaliser les différentes parois des bâtiments (murs, toiture, plancher,...), il permet de constituer une enveloppe à isolation répartie. La mise en œuvre de ce matériau reste artisanale. L'amélioration de ses performances nécessite des études sur la formulation et les procédés mais également sur les méthodes de détermination des propriétés en usage. Depuis quelques années, différents travaux ont été menés pour la caractérisation acoustique, mécanique, thermique et hydrique [COL, 04][DES, 05][CER, 05][EVR, 06][COL, 07][ELF, 08]. Ces études sont primordiales pour la mise en place d'une certification. Mais, il s'avère que les résultats présentés dans la littérature peuvent varier d'une façon importante [HUS, 08] et ne sont pas forcément représentatifs du matériau en usage. Les procédés de mises en œuvre diffèrent et l'hétérogénéité du matériau induisent des difficultés pour déterminer des propriétés représentatives. Pour répondre à cette problématique, le projet ANR/Matériaux&Procédés « BETONCHANVRE (2007-2010) » [GLO, 11-2] a été initié. Ce programme associe trois laboratoires universitaires (LIMATB, LGCGM, GeM) et trois entreprises du secteur (Easychanvre, SI2C, Terrachanvre).

Les objectifs du projet ANR Betonchanvre sont :

- de caractériser les bétons de chanvre et enduits initialement mis en œuvre par les partenaires industriels,
- de mettre au point de nouvelles formulations en vue d'optimiser les procédés de fabrication,
- de caractériser l'effet des liants, du type de chanvre et du traitement du chanvre sur les caractéristiques du matériau.
- Il s'agit notamment de comprendre le confort ressenti à partir de la caractérisation hydrique du matériau.

Les études réalisées dans le cadre de cette thèse sont donc focalisées sur l'étude du comportement thermo-hydrique et mécanique de différents bétons de chanvre.

1.2 Le béton de chanvre et ses constituants

1.2.1 Le Chanvre

a. Généralités

Le chanvre (*Cannabis Sativa*) est cultivé par l'homme depuis le néolithique pour ses fibres résistantes, ses graines oléagineuses et ses vertus médicinales. Sa culture a perduré durant plusieurs siècles principalement en raison de l'utilisation de sa fibre pour réaliser les voiles de bateau, du cordage ou des vêtements. Il a longtemps occupé une place prépondérante dans le paysage agricole européen. Couvrant la France de près de 200 000 ha au XIXe siècle, il a vu son activité décroître du fait de la concurrence de fibres exotiques ou artificielles. Devenue de plus en plus rude, cette dernière a fait quasiment disparaître la culture du chanvre en Europe au début des années 1960 [BUT, 04]. Des années 1940, jusqu'à la fin des années 1990, l'industrie papetière a été le seul véritable débouché industriel du chanvre. Le développement actuel de nouveaux marchés (bâtiment, plasturgie) offre aujourd'hui au chanvre de nouvelles perspectives. L'intégralité de la plante est valorisable et trouve des applications variées (Figure 1.4).

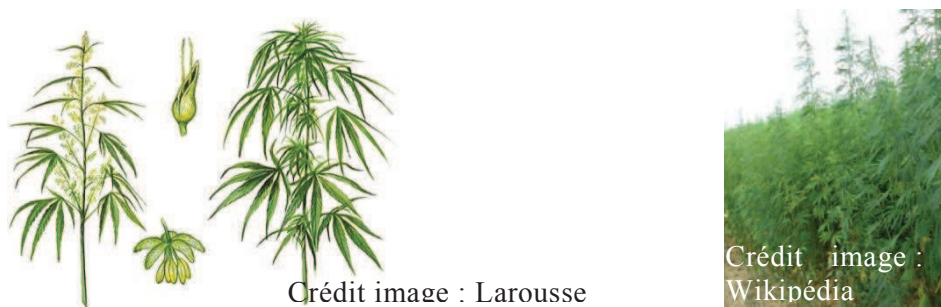


Figure 1.2 Détail d'une tige de chanvre

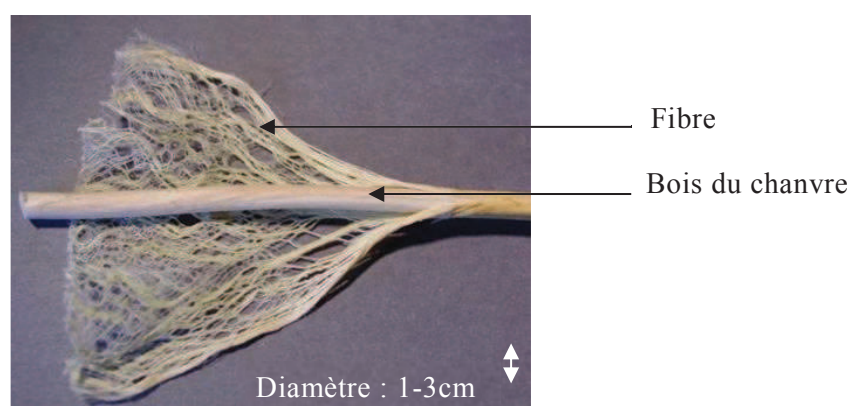


Figure 1.3 Composition d'une tige de chanvre

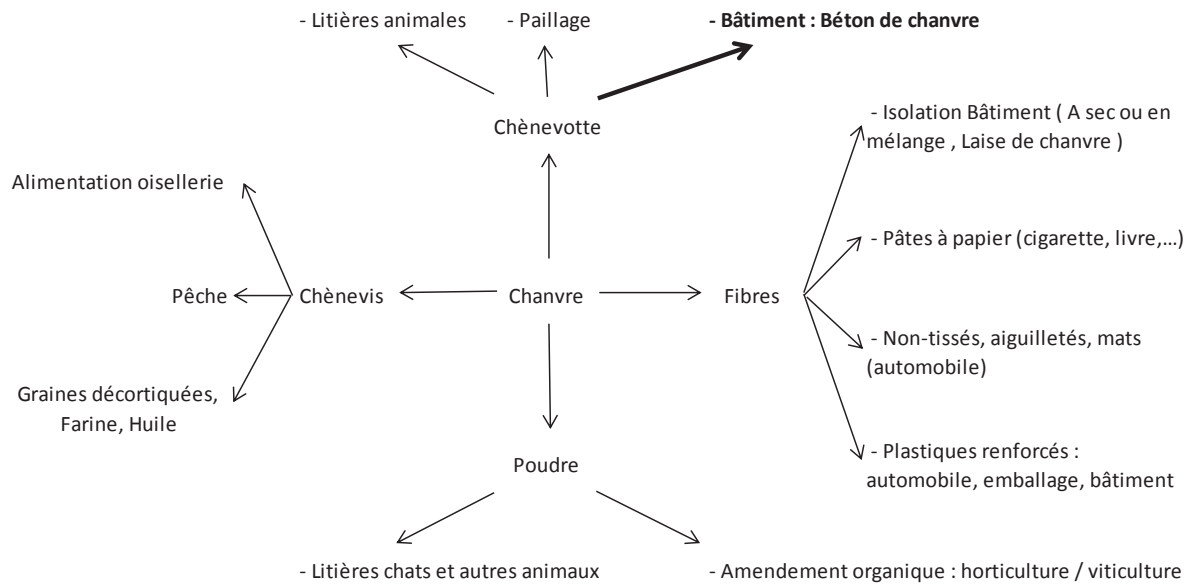


Figure 1.4 Exemple d'utilisation du chanvre

Le chanvre fournit trois co-produits : la graine, les fibres et les chènevottes (longtemps considérées comme un déchet utilisé essentiellement en paillage). La graine n'est pas valorisée dans les matériaux de construction, les fibres peuvent être utilisées pour produire de la laine et les chènevottes pour produire des bétons de chanvre et des enduits.

La transformation du chanvre peut se faire avec un défibrage pour obtenir des fibres et des chènevottes défibrées ou sans défibrage pour obtenir des chènevottes fibrées. Le défibrage du chanvre ne nécessite aucun traitement chimique mais est seulement réalisé sous action mécanique (Figure 1.5).

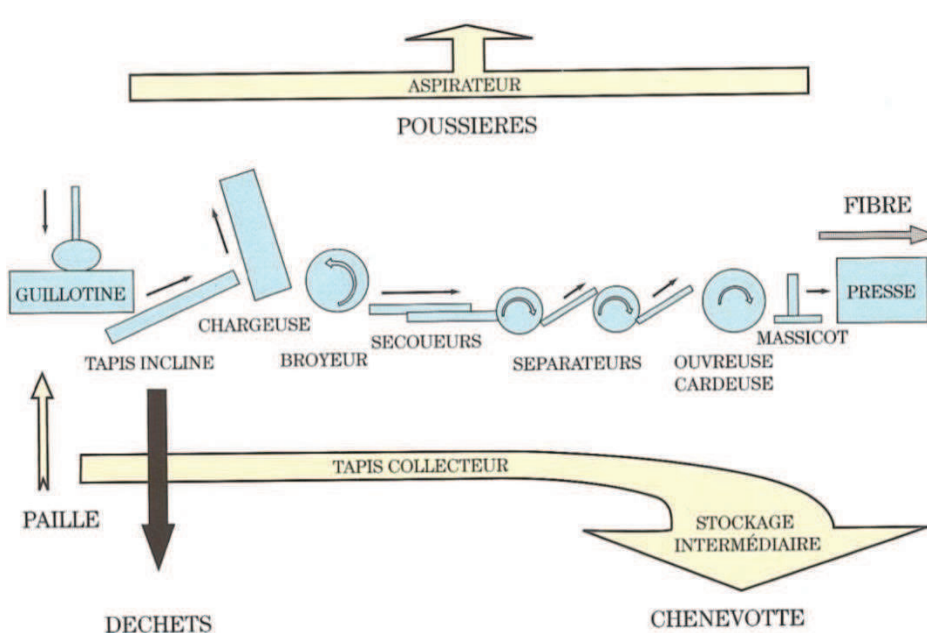


Figure 1.5 Diagramme fonctionnel d'une ligne de défibrage [BOU 2006]

- La décortication désolidarise la matière ligneuse (moelle) de la tige libérienne par une opération mécanique exercée sur la tige entière (guillotine, broyeur).
- La séparation dissocie les différentes fractions végétales obtenues.
- L'affinage se focalise sur les faisceaux afin de réduire le nombre de fibres unitaires par faisceau jusqu'à éventuellement l'obtention de fibres élémentaires.

A l'issue du défibrage, on obtient deux produits (Fibres et chènevotte) et un sous-produit (Poussière ou poudre)(Tableau 1.2).

Fibre	55%
Chènevotte	30%
Poudre	15%

Tableau 1.2 Produits du défibrage du chanvre [BUT, 04]

b. Fibre

La fibre de chanvre est présente sur de nombreux marchés et compose de nombreux produits (Figure 1.4). Elle fait face à la concurrence de multiples matériaux comme le lin, la ramie, le jute, etc.(Tableau 1.3)

Production mondiale de fibres végétales	En milliers de tonnes
Jute	2710
Coco	654
Lin	636
Kenaf	396
Sisal	336
Abaca	104
Chanvre	55
Agave	54
Total	4945
Fibre de verre	2200
Fibre de carbone	17

Tableau 1.3 Production mondiale des principales fibres [FAO, 10]

Le Tableau 1.4 indique le pourcentage de cellulose, le diamètre et la longueur de différentes fibres. Le Tableau 1.5 répertorie les propriétés physiques telles que le module de Young, l'allongement, la densité ou encore la contrainte en rupture à la traction σ_u .

Nature des fibres	%de cellulose	diamètre (µm)	longueur (mm)	Rapport L/D
Lin	64-71	10	5-76	1687
Ramie	83	7.5	16-26	3500
chanvre	78	6.2	10-51	960
Jute	61-71	8	7-47	110
Sisal	67-78	20	7-47	100

Tableau 1.4 Caractéristiques de fibres [BOU, 06]

Fibres végétales	E (GPa)	A (%) Allongement	σ_u (MPa)	Densité
Lin	12-85	1-4	600-2000	1,54
Ramie	61,4-128	1,2-3,8	400-938	1,56
Chanvre	35	1,6	389	1,07
Jute	26,5	1,5-1,8	393-773	1,44
Sisal	9-21	3-7	350-700	1,45
Coton	5,5-12,6	7-8	287-597	1,55
Fibres synthétiques	E (GPa)	A (%) Allongement	σ_u (MPa)	Densité
Filament vierge	72-73	4,6-4,8	3200-3400	2,54
Carbone Toray T300	230	1,5	3530	1,8
Aramide, Kevlar	124	2,9	3620	1,44

Tableau 1.5 Propriétés physiques [BOU, 06]

De ces tableaux on remarque que la fibre de chanvre, avec une densité plus faible, a des caractéristiques semblables aux autres fibres en ce qui concerne le module de Young mais aussi l'allongement. Par contre, la contrainte à la rupture de la fibre de chanvre est en général inférieure à celles des autres fibres végétales.

c. Chènevotte

Les chènevottes sont des granulats issus du bois de la tige de chanvre. Selon le processus de fabrication, différents types de chènevottes peuvent être obtenus : défibrées ou fibrées, courtes ou longues (Figure 1.7). Le type d'outil utilisé lors du process ainsi que les conditions météorologiques de culture affectent les caractéristiques morphologiques des chènevottes.

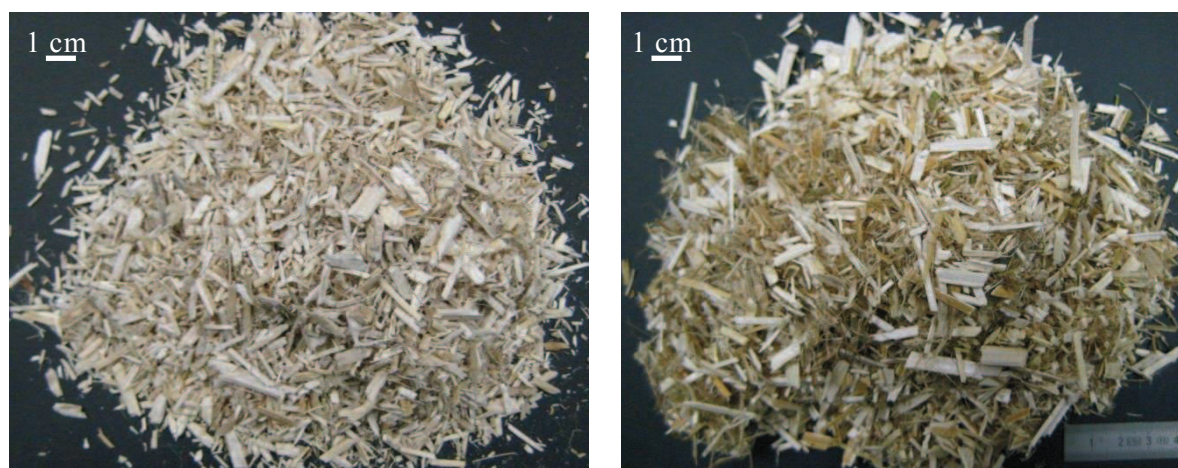


Figure 1.6 Comparaison chanvre défibré et chanvre fibré - Gauche : Chanvre défibré / Droite : Chanvre fibré

La Figure 1.7 présente une vue longitudinale et une coupe transversale d'une chènevotte réalisées au microscope électronique à balayage. Les chènevottes ont une structure poreuse tubulaire de diamètre variant entre 10 et 50 μm constituée de vaisseaux parallèles dans lesquels circule la sève de la plante. Celle-ci étant récoltée à maturité, elle voit la sève se retirer, laissant place à de l'air.

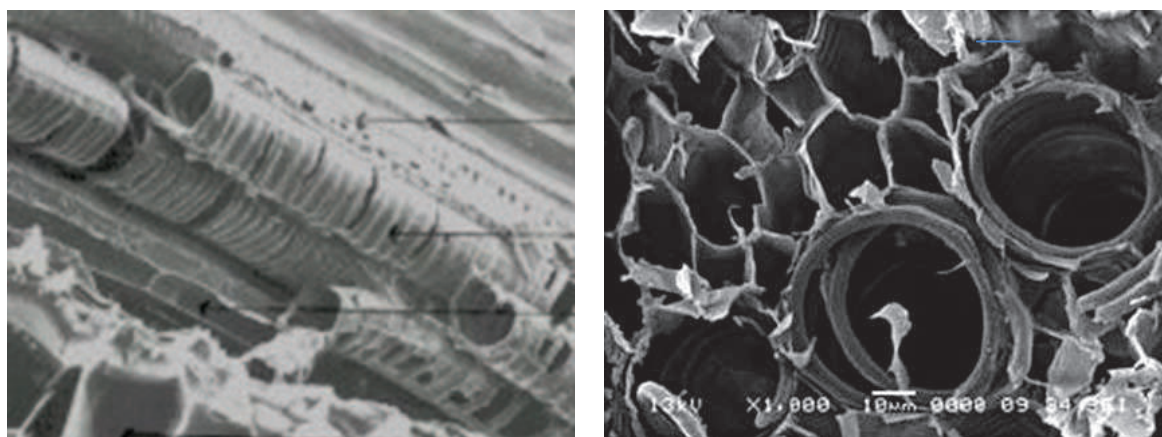


Figure 1.7 Vues au microscope électronique à balayage

Comme rappelé par [BOU, 06], les parois des canaux se décomposent en :

- une paroi primaire qui se présente comme un réseau extensible de microfibrilles de cellulose, englobée dans une matrice amorphe fortement hydratée de pectines et d'hémicellulose. Cette paroi est élastique et remodelable pour assurer l'étirement des cellules.
- une paroi secondaire qui est une structure inextensible et faiblement hydrophobe constituée de cellulose et de lignines. Elle présente trois couches successives se distinguant par l'orientation de leurs fibres de cellulose et conférant une grande résistance de la paroi.

Comme tout produit cellulosique, la chènevotte est sensible à l'eau. Les fibres peuvent voir leur géométrie évoluer au gré des conditions hydriques. De plus, la structure en canaux est favorable à un piégeage de l'eau par capillarité.

Le Tableau 1.6 présente la composition chimique de la chènevotte. Le Tableau 1.7 indique ses propriétés chimiques et ses caractéristiques physiques.

Eau	10 à 15%
Matière organique totale	97,9 sur matière sèche
Cellulose	45 à 60%
Hémicellulose	15 à 20%
Lignine	15 à 30 %
Cendres	2 à 5%
Pentosones	16% de la cellulose
Azote	0,4 à 1%
Potasse (K ₂ O)	0,96 à 1,5%
CaO	0,89 à 1,4%
MgO	0,02 à 0,06%
Na	0.09%
S	0.16%
Bore	21 en ppm du produit brut
Cuivre	0,6 ppm du produit brut

Tableau 1.6 Composition chimique [BOU, 06] ; [TOO, 04]

Propriétés chimiques	Caractéristiques physiques
pH : 7,2	Masse Volumique : 95 - 110 kg/m ³
Inflammable	Humidité : 10-15%
Pouvoir calorifique : 4055 cal/g	capacité de rétention de l'eau : 373,4ml/L

Tableau 1.7 Propriétés chimiques et caractéristiques physiques [BOU, 06]

Le Tableau 1.7 montre que les chènevottes sont légères (masse volumique apparente 100kg.m⁻³), ce qui leur confère une bonne capacité d'isolation. De plus, elles ont une capacité d'absorption d'eau de l'ordre de 3 à 4 fois leur propre poids. Cette propriété justifie leur utilisation pour réaliser du paillage. Cette propriété va également influencer sur le dosage en eau nécessaire lors de la confection de mortiers et bétons de chanvre formulés à base de chènevotte.

1.2.2 Le liant

Le liant minéral associé à la chènevotte dans la composition du béton de chanvre a pour rôle principal d'assurer un minimum de cohésion entre les composants. Cette matrice minérale apporte à l'ensemble une rigidité et une résistance suffisante à l'état durci.

Les liants utilisés pour formuler des bétons de chanvre peuvent correspondre soit à des liants aériens soit à des liants hydrauliques, voire au couplage des deux. Les liants sont quasi-systématiquement des minéraux pulvérulents dont la finesse est assez importante. Le mélange initial de liant, de chènevotte et d'eau permet d'obtenir dans un premier temps une pâte molle, consistance nécessaire à la mise en œuvre (moulage, projection...) puis la rigidification et le durcissement du mélange sont obtenus durant la prise, le durcissement et le séchage de l'ensemble.

Pour garantir que la consistance du béton de chanvre frais soit satisfaisante, les dosages en eau traditionnels sont généralement élevés (rapport massique Eau/Liant compris entre 0,8 et 2). Ces dosages en eau élevés sont aussi induits par un caractère hygroscopique élevé de la chènevotte (point détaillé ultérieurement). Cette caractéristique est certainement une des raisons de l'utilisation de la chaux aérienne comme liant de référence pour le béton de chanvre.

La chaux aérienne, partiellement soluble dans l'eau, permet, malgré des taux de gâchage élevés, d'obtenir des laits ou des coulis onctueux sans risques de ségrégation. Un tel comportement est moins évident en présence de suspensions de liants hydrauliques qui, sans le recours de l'adjuvantation, présentent des risques importants de ségrégation. Ainsi, le ciment portland en coulis sera difficilement exploitable avec un taux de gâchage supérieur à 0,5. De même, un plâtre commercial (liant sulfatique) sera difficilement utilisable au-dessus d'un taux de gâchage de 1,3.

Les taux de gâchage élevés vont bien entendu conditionner les performances mécaniques de la matrice minérale obtenue après prise, durcissement et séchage. Ainsi, Bütschi [BUT, 04] et Brujin [BRU, 09] montrent que la résistance en compression et le module d'Young obtenus peuvent être plus élevés pour les mélanges chaux –ciment portland riches en ciment. Cependant, un taux de gâchage élevé va contribuer à former une matrice minérale poreuse favorable à la régulation hydrique du produit. Durant les phases de séchage, ceci peut conditionner le durcissement. Ainsi, Cerezo [CER, 05] et Bevan & Wooley [BEV, 08] ont montré que, avec les mélanges chaux –ciment, une couche de fine épaisseur de béton de chanvre se solidifie en surface, l'intérieur de l'éprouvette restant à l'état de poudre.

Le phénomène de prise hydraulique, caractéristique des liants hydrauliques, se traduit par une acquisition rapide de résistance du liant. Cette propriété est souvent recherchée par l'utilisateur du béton de chanvre. Cette prise peut par exemple permettre un décoffrage rapide.

La formulation d'un liant pour béton de chanvre doit ainsi associer des objectifs de performances à court terme (phase constructive) et à long terme (phase d'exploitation).

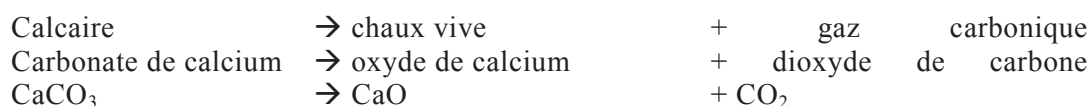
Une description sommaire des différents liants utilisés pour formuler du béton de chanvre est proposée. L'objectif principal est de décrire le mode de réaction du liant ainsi que la cinétique d'évolution de ses caractéristiques.

a. Les chaux

+ Le cycle

Le terme générique chaux recouvre différents types de liants qu'il convient de bien définir. Le procédé de fabrication de la chaux à partir d'un calcaire permet de définir un premier liant : la chaux vive.

La calcination d'un calcaire pur (carbonate de calcium) entraîne la formation de chaux vive et de gaz carbonique comme suit :



Cette réaction s'effectue généralement lors d'une cuisson à 900°C et s'accompagne d'une perte de masse de près de 45%, du fait de l'émission de gaz carbonique.

La chaux vive (CaO) ainsi obtenue est un liant hydraulique. En présence d'eau, une réaction d'hydratation violente conduit à la formation de chaux hydratée :



La chaux vive, trop réactive, n'est généralement pas utilisée directement. Son hydratation s'accompagne d'un gonflement important et difficile à maîtriser. Cette réaction ne génère pas un effet de prise exploitable pour l'utilisateur.

L'extinction de la chaux vive (par de l'eau) peut être réalisée selon plusieurs procédés. La forme minérale obtenue après extinction dépend de la quantité d'eau utilisée pour l'extinction:

- En quantité limitée, contrôlée : l'extinction produit une chaux hydratée en poudre
- En excès d'eau : l'extinction produit une chaux en suspension (chaux en pâte).

La chaux éteinte, ou chaux hydratée, est également nommée chaux aérienne. Elle est très utilisée en construction : mortiers de chaux destinés aux enduits et à la maçonnerie, béton de chaux....

La chaux aérienne est un liant aérien. Sa solubilité importante facilite son usage en solution/suspension. Mais les performances mécaniques de ce liant sont directement liées à son état hydrique.

La chaux aérienne, exposé à un environnement adapté (humidité suffisante et présence d'acide carbonique en solution) va réagir en se carbonatant et ainsi former du carbonate de calcium.



Cette réaction de carbonatation peut être lente. Certain parlent alors de prise « par carbonatation ». Elle s'accompagne d'une prise de masse du liant associée à une augmentation de volume. Ceci induit généralement une augmentation des performances mécaniques du liant carbonaté liée en partie à l'augmentation de la compacité.

Le terme de prise n'est pas rigoureusement légitime si l'on se réfère à la notion de prise hydraulique.

Le passage du calcaire à la chaux vive, puis à la chaux hydraulique et le retour au calcaire peut être présenté sous la forme d'un cycle récapitulatif dit cycle de la chaux (Figure 1.8) :

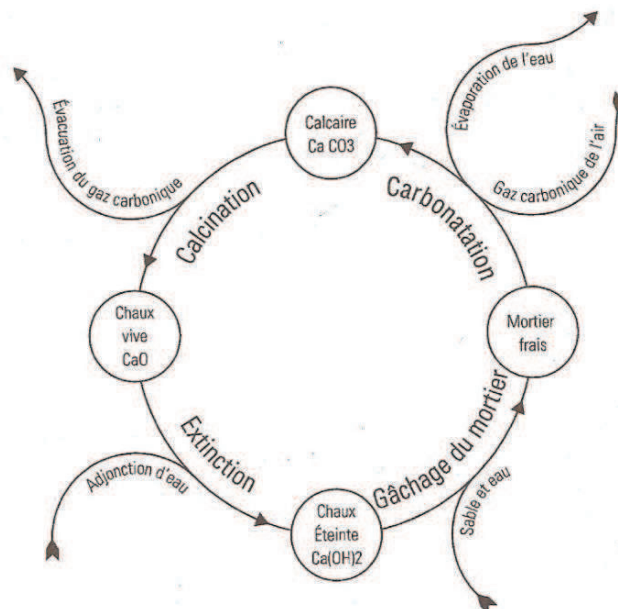


Figure 1.8 Cycle de chaux aérienne [AVI, 03]

+ Types de chaux

Le gisement de calcaire utilisé pour fabriquer la chaux va fortement influencer la qualité du produit final. Ainsi, un gisement de calcaire dolomitique associant des carbonates mixtes de calcium et de magnésium va conduire à l'obtention d'une chaux magnésienne généralement pas valorisée dans les applications bâtiment. Dans la mesure où le calcaire est pollué par des argiles, sa cuisson va conduire à différents types de chaux :

- La chaux aérienne correspond à la cuisson puis l'extinction d'un calcaire pur à plus de 95%

- La chaux hydraulique correspond à une chaux obtenue par cuisson d'un calcaire contenant de l'argile ou des marnes (4 à 16% de Al_2O_3 , 1 à 8% de Fe_2O_3), riches en éléments chimiques comme le fer, l'aluminium et la silice. Lors de la cuisson entre 800°C et 1500°C, le calcium du calcaire se combine avec ces éléments et forme des silicates de calcium mais aussi des aluminates et des ferro-aluminates de calcium. Selon l'origine du calcaire et de la température du four, ces proportions peuvent être variables.

La chaux hydraulique est un liant hydraulique. Par contact avec l'eau, ses constituants vont former des hydrates plus ou moins insolubles potentiellement couplés à de la chaux éteinte.

A l'image d'une chaux aérienne, la chaux hydraulique hydratée peut, au contact de l'air humide, voir ses hydrates se carbonater.

Utilisée seule, la chaux aérienne n'est pas idéale pour la réalisation de béton de chanvre. L'acquisition des résistances est souvent lente [BUT, 04] et conditionnée par l'avancée de la carbonatation qui bien souvent n'est pas homogène [LAW, 06].

Le recours à une chaux hydraulique permet d'assurer une montée en résistance plus rapide à court terme, du fait de la réaction hydraulique de certains de ses composants (prise et durcissement). La phase hydratée peut associer des silicates de calcium hydratés.

b. Le ciment portland

Le ciment portland tire son nom d'une roche naturelle présente en Angleterre ou plus précisément à Portland. Cette roche correspond à un calcaire marneux qui après cuisson conduit à un liant présentant des propriétés hydrauliques importantes. Il faut attendre le milieu du 19ème siècle pour que le français Louis Vicat découvre la structure du ciment et propose une méthode de synthèse industrielle.

Le ciment est fabriqué à l'aide d'un four à une température de 1450°C à partir d'un mélange de calcaire (75%) et d'argile/silice (25%). On obtient en sortie de four des nodules durs et cristallisés appelés clinker.

Le clinker est composé de quatre phases cristallines principales comme le montre le Tableau 1.8 :

Alite	C3S	Silicate tricalcique ($SiO_2 - 3 CaO$)	50-65%
Belite	C2S	Silicate bicalcique ($SiO_2 - 2CaO$)	15-20%
Aluminate	C3A	Aluminate tricalcique ($Al_2O_3 - 3CaO$)	5-15%
Ferrite	C4AF	Ferro-aluminate tétracalcique ($Al_2O_3 Fe_2O_3 - 4 CaO$)	5-10%

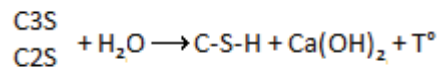
Tableau 1.8 Composition du clinker – 4 phases cristallines
C (calcaire (CaO)) ; S (Silicium (SiO_2)) ; A(Alumine (Al_2O_3)) ; F (Fer (Fe_2O_3))

Ce clinker additionné à du gypse est broyé très finement pour obtenir le ciment dit « Portland »

Il est possible d'ajouter des éléments avant le broyage fin comme des éléments minéraux (laitiers de hauts fourneaux, cendres de centrales thermiques, fillers calcaires, pouzzolanes naturelles ou artificielles, ce qui permet d'obtenir différents ciments avec ajouts.

Lors de l'hydratation du ciment (contact du ciment avec de l'eau), des processus chimiques complexes interviennent. Les réactions d'hydratation rapides conduisent à un phénomène de prise (dissolution du gypse, formation d'hydrates de calcium et réaction du C3A pour former de l'ettringite). Puis des réactions plus lentes d'hydratation se développent. Elles conduisent à la formation de composés insolubles qui contribuent au durcissement de la matrice minérale avec le temps.

En simplifiant les processus, par les réactions des principaux composés du ciment (C3S et C2S) on produit le C-S-H, minéral peu soluble et de la portlandite. Ces réactions sont présentées par l'équation sommaire ci-dessous :



L'hydratation du ciment est caractérisée par une prise rapide et un durcissement lent se développant sur plus d'un mois. L'eau nécessaire à une hydratation théorique du ciment portland représente environ 23 % de la masse de ciment.

A terme, selon l'environnement, la carbonatation de la portlandite résiduelle du ciment peut être amorcée.

Le couplage d'une chaux avec un ciment est possible (liant bâtard). Les modifications de proportion des minéraux présents au départ de l'hydratation peuvent conduire une altération des réactions d'hydratation.

c. Liant pouzzolanique

La pouzzolane est une roche naturelle volcanique (de couleur en général rouge ou noir) correspondant aux scories volcaniques (projections). La composition minérale d'une pouzzolane est celle d'un basalte. Cependant, le refroidissement généralement très rapide de cette roche conduit à un état généralement très peu cristallisé. Les silicates et les aluminates contenus dans cette roche amorphe sont donc potentiellement activés en présence de chaux. Les produits de réaction sont hydratés et présentent une certaine similitude avec les produits d'hydratation du ciment.

De façon générique, un liant pouzzolanique correspond à un liant dont les composés sont susceptibles de réagir avec la portlandite pour former des hydrates stables.

Le metakaolin obtenu par cuisson du kaolin est un alumino-silicate présentant un caractère pouzzolanique fort. Il est utilisé en ajout à la chaux pour doper à terme les caractéristiques mécaniques du béton de chanvre.

On peut également noter que les pouzzolanes naturelles contiennent des alcalins (K et Na) en teneur non négligeable. Placés à pH élevé en présence de portlandite, ces composés peuvent interférer avec les alumino-silicates pour conduire à des réactions

d'hydratation rapide relevant de la chimie des géopolymères. On peut alors parler d'une prise, caractérisée par l'acquisition de résistances sensibles [NOZ, 12].

d. Les liants sulfatiques

Le sulfate de calcium (CaSO_4) est un composé chimique provenant des roches sédimentaires se présentant sous la forme de gypse : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (forme dihydratée) ou sous sa forme anhydre (CaSO_4). Il prend l'apparence d'un solide cristallin blanc. La cuisson du gypse entre 150 et 400 °C permet de former des phases partiellement hydratées telles que l'hémihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) appelé communément le plâtre ou complètement anhydre : l'anhydrite. Ces produits de cuisson sont des liants hydrauliques. Leur hydratation conduit à la reformation du gypse qui reste un composé très soluble.

Les cinétiques de réaction sont rapides. De quelques minutes pour le plâtre à quelques jours pour des anhydrite cuites à haute température.

L'anhydrite nécessite 20% de sa masse en eau pour son hydratation totale. Le plâtre nécessite 16%.

La prise des liants sulfatiques conduit à des résistances mécaniques sensibles directement conditionnées par le taux de gâchage utilisé. Le gypse étant soluble, les résistances sont aussi très dépendantes de l'état hydrique de la matrice.

L'utilisation de liants sulfatiques pour formuler des bétons de chanvre reste possible. Il convient cependant de bien maîtriser l'état hydrique du matériau. Plus généralement, le liant sulfatique est couplé avec une chaux. Il apporte un raidissement à court terme particulièrement intéressant pour des démoulages rapides.



Figure 1.9 Sulfate de calcium – CaSO_4 anhydre

e. Caractéristiques des liants

+ Masses volumiques

Le Tableau 1.9 synthétise l'ensemble des valeurs de masses volumiques apparentes et réelles des principaux composés des liants ou des produits d'hydratation.

+ Surface spécifique

La finesse des grains de liant d'origine minérale est définie par la surface spécifique. Celle-ci représente la surface totale des grains exprimée en cm^2 contenus dans un gramme de liant en poudre. Cette surface est d'autant plus importante que les grains sont de faible dimension. La réactivité sera alors plus grande.

Dans le cas de la chaux aérienne et hydraulique naturelle, la finesse des grains est fonction du procédé d'extinction. Les grains sont en effet plus fins si l'extinction est

le stockage interviennent en milieu aqueux. La chaux en pâte présente ainsi la plus grande finesse.

Le Tableau 1.9 indique pour les différents types de liants des valeurs indicatives de leurs surfaces spécifiques.

Nature	Masse volumique apparente [kg.m ⁻³]	Masse volumique réelle [kg.m ⁻³]	Surface spécifique
Chaux vive CaO	800 - 1000	3400	3000 à 10000
Portlandite Ca(OH) ₂ poudre	490 à 700	2230	8000 à 20000
Chaux en pâte	1400 à 2000	-	Environ 40000
Chaux hydraulique (naturelle)	700 à 1000	2200-2800	3000 à 8000
Calcaire pur		2710	
Ciment portland	800 - 1300	3000 à 3150	2700 à 5000
CSH	-	2800	
Anhydrite		2900	5000 à 12000
Hémihydrate		2760	3000 à 4000
gypse	1500 - 2500	2320	

Tableau 1.9 Propriétés physiques

1.3 Caractéristiques du béton de chanvre

Le béton de chanvre est un matériau présentant un comportement hygrothermique particulier, facteur d'un confort ressenti évident pour l'utilisateur. Ce matériau n'étant pas porteur, il est utilisé comme matériau de remplissage associé à une ossature. Après avoir présenté ses caractéristiques physiques, nous nous intéresserons à son comportement hydrique, thermique et mécanique.

1.3.1 Généralités

En fonction du dosage en liant, les formulations de béton de chanvre vont jouer des rôles différents au sein du bâtiment.

A faible dosage en liant, le béton de chanvre sera utilisé comme une formulation de type toiture. A dosage en liant moyen, ces formulations seront de type enveloppe (Mur, Dalle). A très fort dosage en liant, les formulations seront de type Enduit.

La Figure 1.10 et le Tableau 1.10 montrent une schématisation du béton de chanvre en fonction de l'utilisation ainsi que les proportions massiques des constituants [EVR, 08].

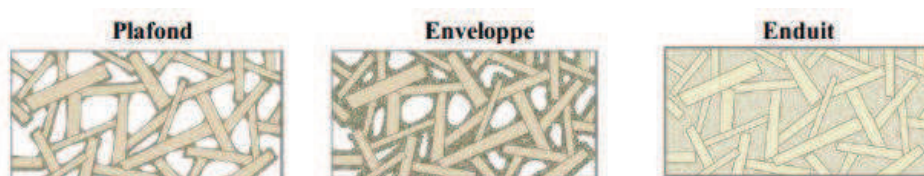


Figure 1.10 Schématisation de la matrice en fonction de l'utilisation [EVR, 08]

	Plafond	Enveloppe	Enduit
Chanvribat	73%	55%	43%
Tradical PF70	10%	23%	36%
Eau	17%	22%	21%

Tableau 1.10 Exemple de Dosage massique en fonction de l'utilisation [EVR, 08]

1.3.2 Caractéristiques physiques

a. Milieux poreux : masse volumique et porosité

Le béton de chanvre est un milieu poreux hétérogène à trois phases.

- Phase solide : Matrice solide,
- Phase liquide : Eau occupant une partie de l'espace poreux,
- Phase gazeuse : Air et vapeur d'eau occupant l'autre partie de l'espace poreux.

Les milieux poreux sont caractérisés par :

- La masse volumique apparente,

- La matrice solide : distribution du diamètre des grains, composition minéralogique et chimique, la masse volumique des grains. Cette matrice est considérée homogène, isotrope, indéformable et inerte chimiquement,
- La porosité totale, la porosité ouverte et la porosité fermée,
- Le réseau poreux : distribution du diamètre des pores, la surface spécifique, géométrie du réseau poreux.
- Les réseaux poreux sont constitués de (Figure 1.11) :
- Pores interconnectés ou connectés : espace continu dans le réseau qui favorise le transport de matière au sein du matériau,
- Pores isolés ou occlus : non accessible,
- Pores aveugles, bras morts ou piégés : Espace accessible mais ne participant pas au transport de matière.

En outre, ces pores peuvent être de formes cylindriques, d'entonnoir, de « bouteille d'encre » (col étroit et corps large) ou de microfissures.

La porosité interconnectée contribue au transfert de masse au sein du milieu poreux. La porosité ouverte, constituée des pores interconnectés et des pores aveugles, est accessible et contribue ainsi au stockage au sein du milieu. Enfin, la porosité fermée ne contribue ni au transfert ni au stockage de l'humidité. Cette porosité influera sur la masse volumique apparente ainsi que sur le comportement thermique et mécanique du milieu.



Figure 1.11 Types de porosité présente dans le matériau
a) Connecté – b) Isolés, occlus – c) Aveugle, bras mort, Piégé

Les pores sont classés par tailles [IUP, 94] :

- Supérieur à 50 nm : Macropores,
- Compris entre 2 et 50 nm : Mésopores,
- Inférieur à 2nm : Micropores.

Les différentes terminologies utilisées sont définies à partir de la Figure 1.11 et du diagramme de phases (Figure 1.12).

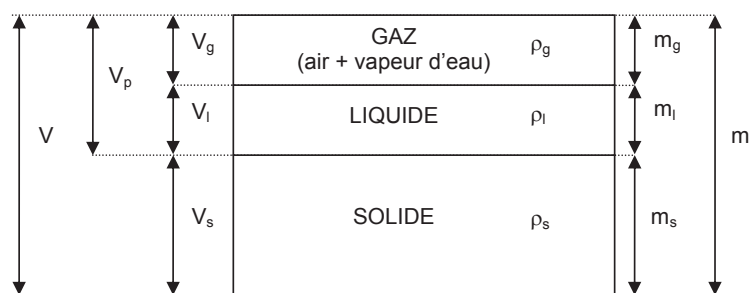


Figure 1.12 Les différentes phases d'un milieu poreux non saturé

Notation	Grandeur	Unité
V	Volume apparent	[m ³]
V _s	Volume solide	[m ³]
V _l	Volume liquide	[m ³]
V _g	Volume gazeux	[m ³]
V _p	Volume des pores	[m ³]
m	Masse totale	[kg]
m _s	Masse solide	[kg]
m _l	Masse liquide	[kg]
m _g	Masse de gaz (négligeable)	[kg]
m _{sat}	Masse du matériau saturé	[kg]

Tableau 1.11 Définition des volumes et des masses d'un milieu poreux

Notation	Grandeur	Relation	Unité
m	Masse totale	$m = m_s + m_l + m_g$	[kg]
V	Volume apparent	$V = V_s + V_l + V_g$	[m ³]
V _p	Volume des pores	$V_p = V_l + V_g$	[m ³]
ρ	Masse volumique apparente	$\rho = \frac{m}{V}$	[kg.m ⁻³]
ρ _s	Masse volumique absolue	$\rho_s = \frac{m_s}{V}$	[kg.m ⁻³]
n	Porosité totale	$n = \frac{V_l + V_g}{V} = \frac{V + V_s}{V} = \frac{\rho_s + \rho_0}{\rho_s}$	[%]
n ₀	Porosité ouverte	$n_o = n - n_{fermée}$	[%]
w	Teneur en eau	$w = \frac{m - m_s}{m_s}$	[%]
w _{sat}	Teneur en eau de saturation	$w_{sat} = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s}$	[%]

Tableau 1.12 Grandeurs physiques associées à un milieu poreux

Les masses volumiques apparentes sont de l'ordre de 200 à 250 kg.m⁻³ pour les bétons de chanvre utilisés comme matériau d'isolation en toiture, de l'ordre de 350 à 450 kg.m⁻³ pour les bétons de chanvre utilisés pour réaliser des murs et de l'ordre de 500 kg.m⁻³ pour les bétons de chanvre utilisés en isolation des sols.

Les bétons de chanvre sont des matériaux très poreux. Pour les formulations murs, les porosités totales sont de 72 à 80 % [COL, 04],[SAM, 08]. Cette porosité, majoritairement ouverte, est constituée de macropores correspondant à la porosité interparticulaire, de mésopores (au sein de la matrice liant) et de micropores présents au sein des particules végétales et de la matrice liant également (Figure 1.14).

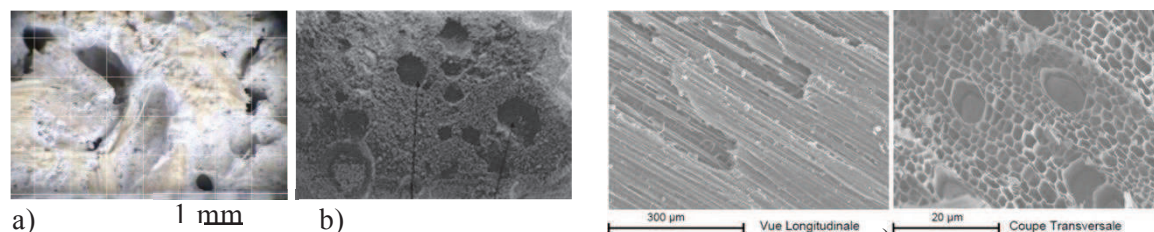


Figure 1.13 Porosité d'un béton de chanvre : a) macroporosité interparticulaire [CER, 05] – b) porosité au sein du liant [CER, 05] – c) porosité au sein des chènevottes [CHA, 11]

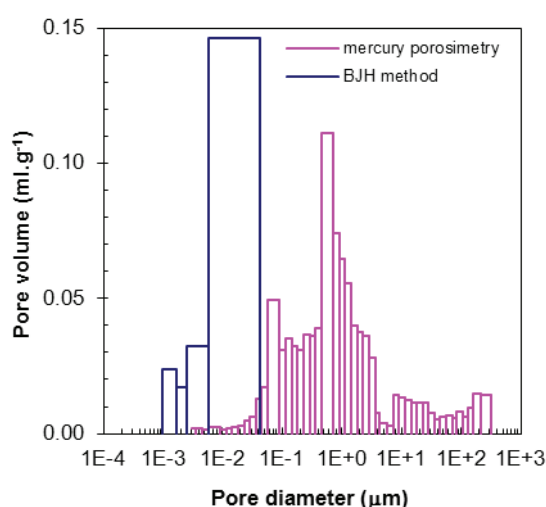


Figure 1.14 Distribution porale d'un béton de chanvre [COL, 08]

b. Volume élémentaire représentatif

Les études de caractérisation des propriétés hydriques du béton de chanvre doivent être réalisées sur des échantillons considérés macroscopiquement homogène. Pour cela, le volume de l'échantillon doit être au moins égal au Volume Elémentaire Représentatif (VER).

Jacob Bear [BEA, 72] définit le VER ΔV_0 en utilisant une méthode basée sur la mesure de la porosité du matériau (Figure 1.15)

Il existe un volume minimum ΔV_0 en dessous duquel la mesure de la porosité tend vers 0 ou 1 car le volume considéré est proche de celui des pores.

Au-dessus d'un certain volume ΔV_1 , lorsque le matériau présente des hétérogénéités macroscopiques, la porosité peut évoluer progressivement.

Entre ces deux valeurs, le volume peut être considéré comme homogène et on peut en mesurer les propriétés physiques [BIH, 07][COL, 04].

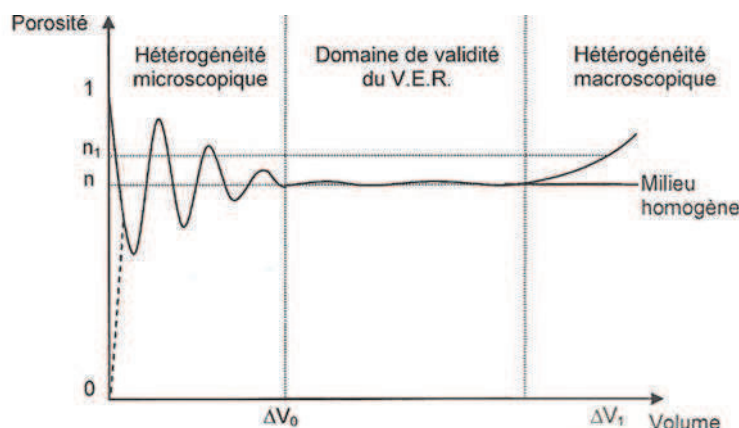


Figure 1.15 Volume élémentaire représentatif [BEA, 72]

Collet [COL, 04] a déterminé le Volume Elémentaire Représentatif du béton de chanvre à partir de la mesure de masse volumique apparente sur des échantillons de plus en plus petits (20, 10, 5 et 2,5 cm d'arrête). Six échantillons sont testés pour le volume de 20 cm d'arrête, huit échantillons sont testés pour les autres volumes. Deux formulations de béton de chanvre A et B sont considérées. Deux critères doivent être satisfaits pour que le volume testé soit considéré comme représentatif :

- La variation de la masse volumique apparente moyenne ne doit pas excéder 5% par rapport à celle des échantillons de 20 cm de côté.
- Le coefficient de variation des échantillons d'une série testée ne doit pas dépasser 10%.

Le Tableau 1.13 présente les résultats obtenus. Les échantillons de 10 et 5 cm d'arrête respectent les critères et sont donc représentatifs du matériau. Les échantillons de 2,5 cm d'arrête présentent une masse volumique apparente moyenne correcte mais un coefficient de variation très élevé. Les échantillons de 2,5 cm d'arrête ne sont donc plus représentatifs du béton de chanvre. Ceci s'explique en particulier par les dimensions des chènevottes et de la porosité interparticulaire.

Arrête [cm]		20	10	5	2,5
A	ρ_{moy} [kg.m ⁻³]	398	414	408	382
	Coef. Variation [%]	5,8	1,9	6,6	8,6
	Variation par rapport au cube de 20 cm d'arrête [%]	-	4,02	2,5	4,02
B	ρ_{moy} [kg.m ⁻³]	426	422	438	424
	Coef. Variation [%]	3,3	6,9	5,7	25
	Variation par rapport au cube de 20 cm d'arrête [%]	-	0,9	2,8	0,5

Tableau 1.13 Masses volumiques apparente, coefficients de variation et variations par rapport à un échantillon de 20 cm de côté [COL,04]

Evrard [EVR, 08] a également évalué le VER de béton de chanvre par analyse visuelle. Il approxime la dimension du VER à 4,7 cm, ce qui corrobore la valeur de 5 cm proposée par Collet.

c. Capacité d'absorption d'eau

En présence de particules végétales poreuses, il convient de s'intéresser également à leur capacité d'absorption d'eau. Celle-ci est liée notamment à la taille des capillaires. Cerezo [CER, 05] et Couedel [COU, 98] montrent des capacités d'absorption de l'ordre de 250%.

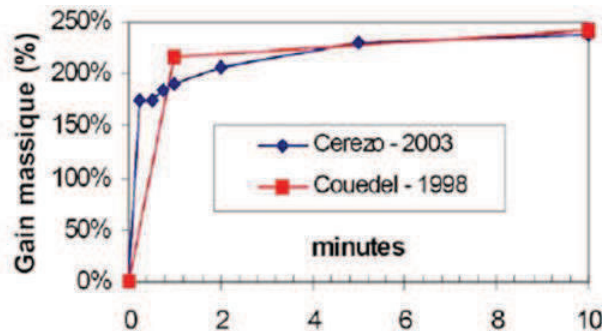


Figure 1.16 Capacité d'absorption de chènevottes

La cinétique d'absorption peut se décomposer en deux étapes. Dès les premières secondes d'immersion, une quantité d'eau importante est captée par la chènevotte. Ce phénomène rapide est certainement à associer au remplissage des pores les plus gros. Puis une cinétique plus lente prend place. Le remplissage des capillaires les plus fins et d'imbibition des membranes celluloses de la chènevotte correspond à cette phase. Un gonflement sensible de la chènevotte est également associé à l'absorption.

1.3.3 Caractéristiques hydriques

Les milieux poreux ouverts sont le lieu de stockage et de transfert d'humidité.

a. Stockage de l'humidité : isotherme de sorption

+ Généralités

Les matériaux poreux, de porosité ouverte, ont la propriété de fixer l'humidité de l'air environnant. Une augmentation de l'humidité de l'air au voisinage du matériau entraîne une augmentation de la masse apparente de celui-ci. Cette augmentation de masse apparente est due à la fixation de molécules d'eau en surface du matériau : c'est le phénomène d'adsorption. Inversement, une diminution de l'humidité de l'air environnant entraîne une diminution de la masse apparente : c'est le phénomène de désorption.

Cette caractéristique physique est représentée par des courbes d'équilibre dans des conditions isothermes : les isothermes d'adsorption/désorption.

Une isotherme d'adsorption/désorption relie la teneur en eau d'un matériau à l'humidité relative HR ambiante lorsque celui-ci est en équilibre avec cette atmosphère.

+ Mécanismes de fixation et classification des isothermes

La fixation de l'eau sur le matériau peut se faire chimiquement ou physiquement.

L'adsorption chimique résulte d'une réaction chimique en surface du matériau : cette réaction d'hydratation est irréversible. Ici, les matériaux étant supposés chimiquement inertes, ce type d'adsorption ne sera donc pas considéré.

L'adsorption physique peut être décomposée en trois phases (Figure 1.17).

Dans un premier temps, les molécules d'eau recouvrent en une couche la surface des pores où elles sont maintenues sous l'effet des forces de VAN DER WAALS : c'est l'adsorption monocouche ou monomoléculaire.

Puis, lorsque l'humidité devient plus importante, d'autres couches de molécules d'eau se fixent à la première. Il s'agit de l'adsorption multicouche ou polymoléculaire.

Enfin, aux humidités relatives plus fortes les couches polymoléculaire se rejoignent et forment un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque. L'eau est retenue à la surface des pores par les forces capillaires. Ceci entraîne le remplissage des pores les plus fins puis des pores plus importants : c'est la condensation capillaire.

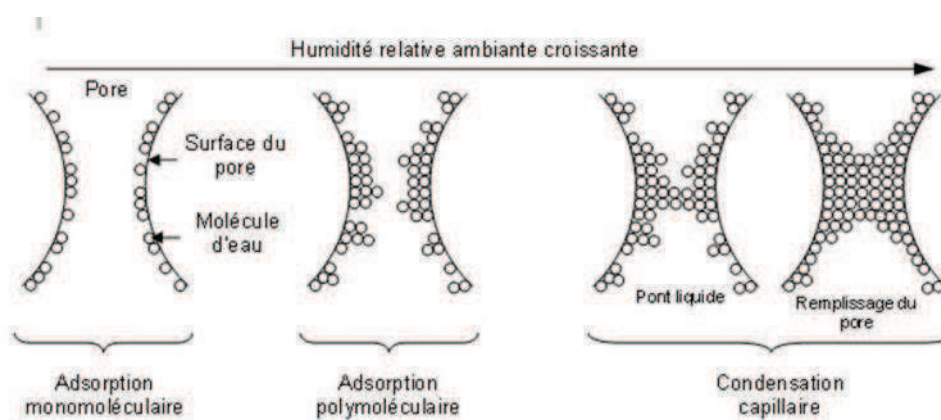


Figure 1.17 Mécanismes de fixation de l'humidité

L'isotherme d'adsorption est l'image des interactions entre un solide et un adsorbat. L'allure des isothermes est classée par l'I.U.P.A.C. [IUP, 85] comme le montre la Figure 1.18.

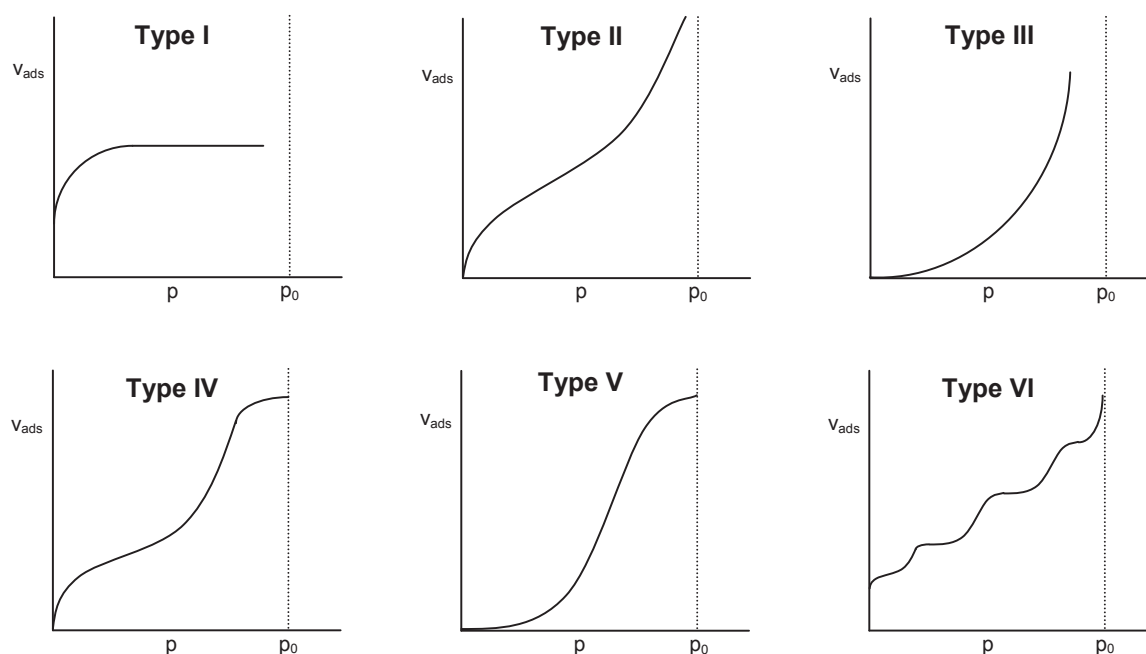


Figure 1.18 Les différentes classes, IUPAC, 1985.

Type I : Présence d'un plateau horizontal jusqu'à la pression de vapeur saturante ($HR=100\%$). Ce type d'isotherme est caractéristique du remplissage de micropores à faibles pressions relatives, souvent décrit par une isotherme de Langmuir. Il peut ici y avoir de fortes interactions en jeu (éventuellement chimisorption). C'est une adsorption monomoléculaire.

Type II : cette isotherme présente une forme sigmoïde et est marquée par un point d'inflexion correspondant à la transition de fixation monomoléculaire à polymoléculaire. Ces isothermes correspondent à des solides non poreux ou macroporeux. L'adsorption est plus facile sur la première couche adsorbée que sur la surface.

Type III : Cette isotherme montre une montée continue de la quantité adsorbée. Le fait qu'il n'y ait pas de point d'inflexion clairement identifiable (correspondant au remplissage d'une monocouche) est dû à la superposition de l'adsorption monocouche et multicouche. Ces isothermes sont très répandues pour des solides non poreux ou macroporeux.

Type IV et type V : Ces isothermes se rapprochent respectivement des isothermes de type II et de type III. Il y a, en plus, remplissage de mésopores et condensation capillaire dans les pores. Ce type d'isotherme peut présenter différents types d'hystérésis

Type VI : Ce type d'isotherme en « marches » correspond à une adsorption multicouche. Chaque marche correspond à une adsorption monocouche sur la couche précédente. Ce type d'isotherme est obtenu sur des surfaces non-poreuses.

+ Désorption et hystérésis

La teneur en eau observée en désorption peut être supérieure à celle observée en adsorption [DON, 98]. En général, elle est liée à la condensation capillaire. De plus l'hystérésis peut être liée à la forme des pores (« bouteilles ») ou à la structuration des pores (interconnexions).

A des pressions relatives supérieures à 0,3 (pression à laquelle la monocouche est souvent complète), de Boer a identifié 4 types d'hystérésis qu'il a corrélées à différentes formes de pores (Figure 1.19).

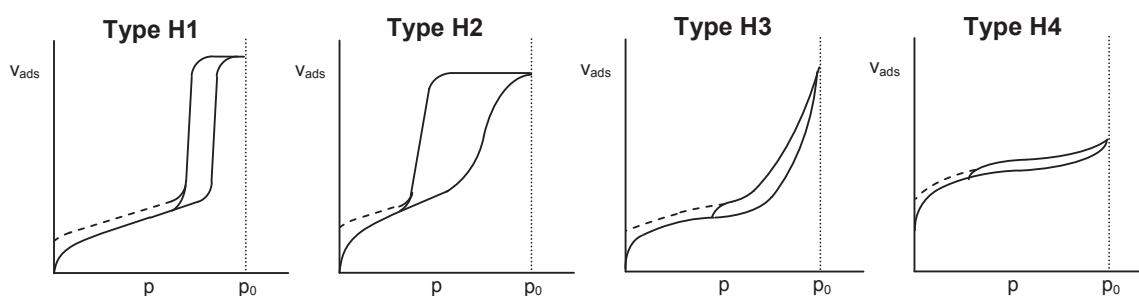


Figure 1.19 Classification des hystérésis d'adsorption/désorption, [IUP, 85].

De manière générale, lorsque l'on atteint un palier à haute pression relative, l'hystérésis est due à une condensation capillaire dans des pores (type H1 et H2).

Dans le type H1, les branches d'adsorption et de désorption sont quasiment parallèles. Ce type d'hystérésis est rencontrée par des milieux ayant une distribution de pores mono-disperses.

Une désorption très lente à son début (type H2), peut être due à des pores en forme de bouteille d'encre et/ou à des pores de formes différentes interconnectés : la désorption est alors retardée jusqu'à ce que l'évaporation puisse se produire au niveau de l'entrée étroite du pore ou aux interconnexions. Ici les branches ne sont plus parallèles : sur l'adsorption, on aura le phénomène de condensation capillaire dans les pores les plus larges, sur la désorption, on aura le phénomène de vidange dans les pores les plus étroits.

Lorsque l'on n'a pas de palier en fin d'adsorption (type H3), les hystérésis sont alors fortement dépendantes des conditions expérimentales, notamment du seuil de saturation. Elles ne correspondent pas à une porosité rigide : on obtient par exemple ce type d'hystérésis pour des agrégats, des particules en forme de plaquettes ou de feuillets gonflant sous l'effet de la condensation capillaire.

Le type H4 ne présente pas non plus de palier et peut être obtenu pour des particules sous forme de feuillets. Dans ce cas, il y a coexistence d'une forte microporosité et d'une faible macroporosité en lien avec la faible teneur en eau de saturation.

La courbe de sorption obtenue dans le cas d'une chènevotte traditionnellement utilisée dans la formulation de bétons de chanvres est proposée par SAMRI (Figure 1.20) [SAM, 08].

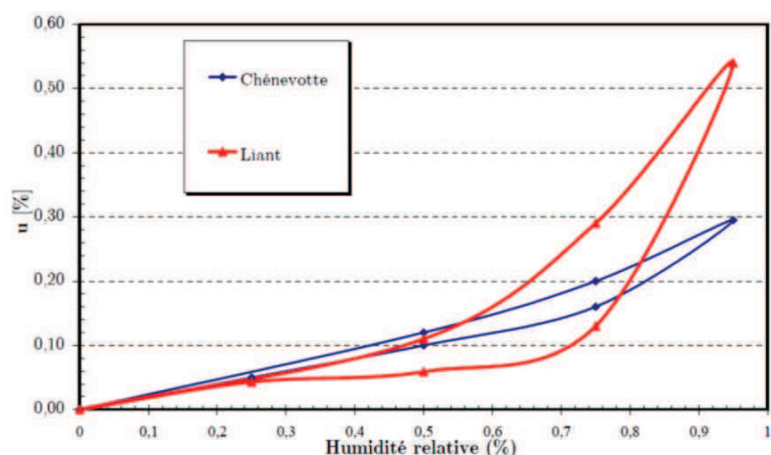


Figure 1.20 Courbe de sorption d'une chènevotte et d'un liant traditionnellement utilisé pour la formulation de béton de chanvre [SAM, 08].

On constate que la courbe caractéristique d'une chènevotte présente une hystérésis importante. Une capacité de stockage d'eau au sein de la structure de la chènevotte est donc notable. Dans le même esprit, Zaknoune [ZAK, 11] utilise une mesure par DVS pour identifier la courbe de désorption d'autres chènevottes (chanvribat, terrachanvre), présentée sur la Figure 1.21. On peut remarquer le peu d'influence de la nature des chènevottes sur le comportement hydrique.

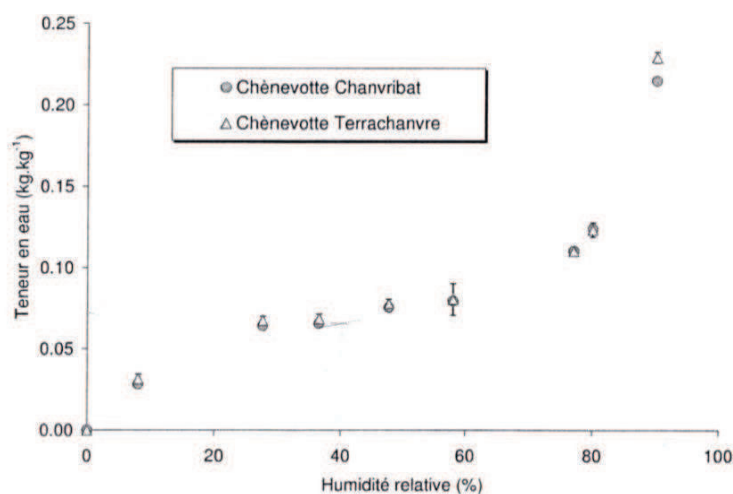


Figure 1.21 Courbe de désorption des chènevottes Chanvribat et Terrachanvre [ZAK, 11].

Le même type de travail a été abordé par [CER, 05] ou [COL, 04] [COL, 08] dans le cas de différents bétons de chanvre (Figure 1.22).

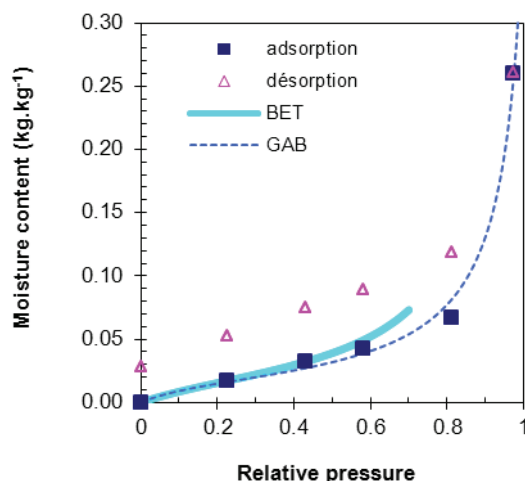


Figure 1.22 Exemple de courbes de sorption de béton de chanvre [COL,08]

On constate qu'une hystérésis marquée est également présente sur les courbes de sorption du béton de chanvre. Le dosage du béton, la nature du liant, le taux de compactage du mélange à la mise en œuvre vont également conditionner les résultats. Analyser de tels effets constitue un des objectifs de cette thèse.

b. Capacité de transfert

Les milieux présentant une porosité ouverte sont le siège de flux d'humidité lorsqu'ils sont soumis à des gradients de différents potentiels (pression totale, pression de vapeur, température...) Le flux total d'humidité g_h est alors la somme des flux de vapeur g_v et flux liquide g_l selon l'équation :

$$g_h = -\left(\pi_{v\,dif} + \pi_{v\,eff} + \frac{\rho_l r_v T}{P_v} K_l\right) \nabla P_v = -\pi \nabla P_v \quad [E\,1.1]$$

π : Perméabilité vapeur [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$]

$\pi_{v\,dif}$: perméabilité à la vapeur par diffusion moléculaire à l'échelle macroscopique

$\pi_{v\,eff}$: perméabilité à la vapeur par effusion à l'échelle macroscopique

K_l : conductivité hydraulique

La grandeur communément appelée « perméabilité à la vapeur » est en fait la somme de trois termes relatifs aux différents modes de transport en présence :

- Transport vapeur par diffusion,
- Transport vapeur par effusion
- Transport liquide par écoulement liquide

La densité de flux de vapeur (par diffusion ou par effusion) s'écrit

$$g_v = -D_v \frac{\overline{M}_v}{RT} \nabla P_v \quad [E\,1.2]$$

D_v : coefficient de diffusion de vapeur dans le milieu poreux [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$],

\overline{M}_v : masse molaire.

Le coefficient de diffusion de vapeur dans le milieu poreux est proportionnel au coefficient de diffusion de vapeur dans l'air libre et au nombre de Knudsen :

$$D_v = \frac{D_0}{1+K_n} \text{ avec } K_n = \frac{L_{pm}}{d_p} \quad [E 1.3]$$

D_0 : Coefficient de diffusion de vapeur dans l'air libre [$m^2.s^{-1}$]

K_n : Nombre de Knudsen

L_{pm} : Libre parcours moyen [m], dépend de la température et de la pression

d_p : Diamètre des pores [m]

- si $Kn \ll 1$ ou $d \gg L_{pm}$: le transport se fait par diffusion moléculaire libre : les collisions contre les parois sont négligeables par rapport aux collisions entre molécules (Figure 1.23).
- si $Kn \gg 1$ ou $d \ll L_{pm}$: le transport se fait par effusion (ou transport de Knudsen) : le nombre de chocs molécules-paroi est très supérieur au nombre de chocs inter-moléculaires. (Figure 1.23).
- si $Kn \equiv 1$ ou $d \equiv L_{pm}$: le transport se fait par diffusion mixte (domaine de transition) : le transport des molécules est déterminé à la fois par les collisions molécules-paroi et par les collisions intermoléculaires.



Figure 1.23 Mécanismes de transfert de vapeur

D'après De Vries [DEV, 58], l'évolution générale des coefficients de diffusion isothermes Du_v et Du_l est fonction de la teneur en eau u et est composée de 3 parties:

- Aux faibles teneurs en eau, la phase condensée se présente sous forme absorbée ou dans des îlots capillaires. Le transfert d'humidité se fait uniquement par transfert en phase vapeur (cas où $u < u_k$),
- Pour des teneurs en eau plus importantes, les îlots capillaires augmentent en taille et en nombre, la section de passage du flux de vapeur diminue et celle-ci diffuse par des mécanismes de condensation-évaporation aux interfaces liquide-vapeur. Dès que la continuité de la phase liquide s'établit ($u = u_k$), le coefficient Du_l augmente rapidement,
- Aux fortes teneurs en eau, le transfert en phase liquide devient nettement prépondérant.

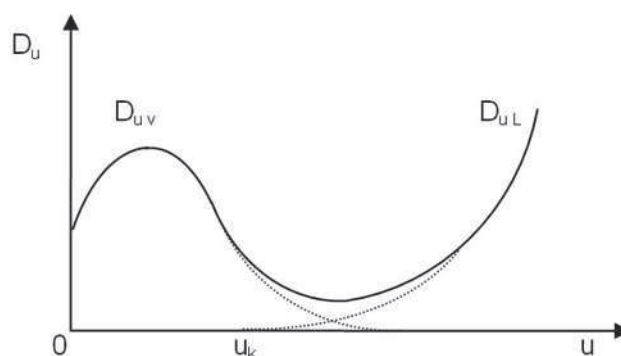


Figure 1.24 Evolution des coefficients de diffusion isothermes [DEV, 58]

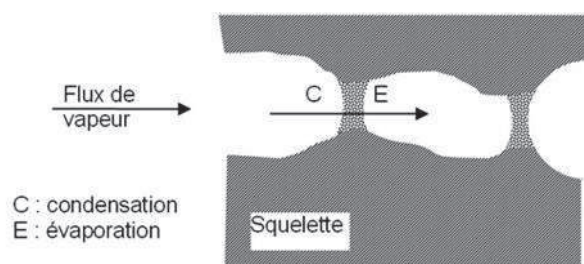


Figure 1.25 Transfert par condensation-évaporation

Collet [COL, 04] a mesuré la perméabilité à la vapeur de bétons de chanvre selon la méthode normative de la coupelle. Les perméabilités obtenues sont de $1,7 \cdot 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ pour le point « sec » et de $2,3 \cdot 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ pour le point « humide » (0/85). A partir de ces mesures et de la dérivée des isothermes de sorption, le coefficient de diffusion isotherme est calculé. Il est de l'ordre de $1,5 \cdot 10^{-11}$ à $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. Son évolution est comparable à celle donnée par De Vries pour la diffusion de vapeur. L'influence de la nature de la chènevotte (fibrée ou non), de la formulation du béton de chanvre, de la nature du liant restent à identifier. Ce travail constitue un des objectifs de cette thèse.

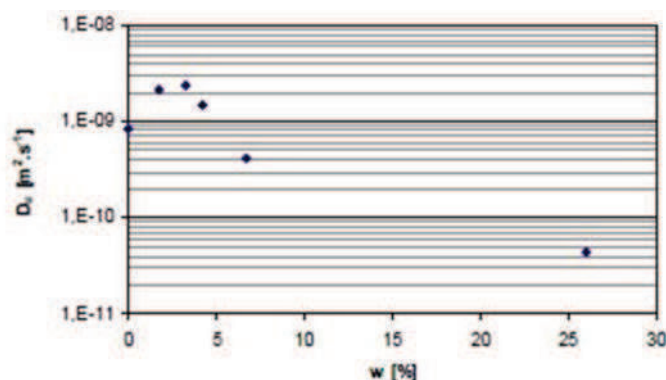


Figure 1.26 Coefficient de diffusion isotherme du béton de chanvre B en fonction de la teneur en eau massique [COL, 04]

1.3.4 Caractéristiques thermiques

Le béton de chanvre présente une forte porosité ce qui lui confère une conductivité thermique adaptée pour une isolation répartie. Du fait de ses propriétés hygroscopiques, sa teneur en eau évolue avec les conditions ambiantes ce qui influe sur sa conductivité thermique.

La conductivité thermique de bétons de chanvre a été étudiée par plusieurs auteurs. Les résultats sont cohérents entre eux. Cerezo [CER, 05] donne des conductivités thermiques entre 0,09 et 0,16 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour des masses volumiques apparentes sèches entre 400 et 700 kg.m^{-3} . Evrard [EVR, 08] obtient des conductivités thermiques entre 0,11 et 0,12 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour des masses volumiques apparentes sèches entre 460 et 500 kg.m^{-3} . Pretot et al. [PRE, 09] donnent des conductivités thermiques, pour une stabilisation à (23°C, 50%HR), comprises entre 0,10 et 0,14 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour des formulations murs (masse volumique comprise entre 390 et 480 kg.m^{-3}) de 0,09 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour une formulation « toit » et de 0,15 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour une formulation dalle (Figure 1.27).

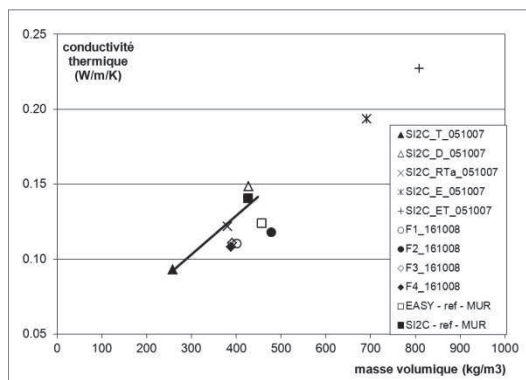


Figure 1.27 Evolution de la conductivité thermique en fonction de la formulation [PRE, 09]

La conductivité thermique des bétons de chanvre est affectée par leur teneur en eau. Selon Cerezo, pour des masses volumiques de l'ordre de 450 kg.m^{-3} , la conductivité thermique augmente de 10% entre le point sec et le point HR=50%. Le même type d'évolution est constaté par Collet [COL, 04] et Collet et al. [COL,08].

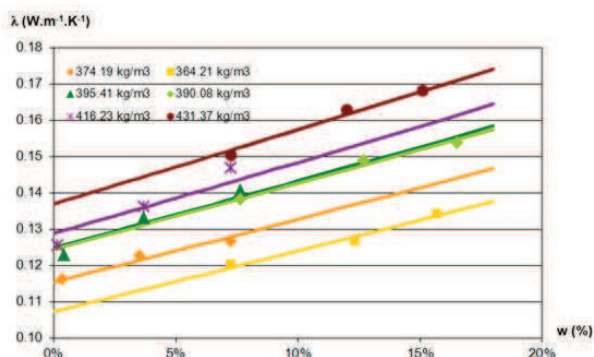


Figure 1.28 Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau pour différentes masses volumiques apparentes de béton de chanvre [COL, 08]

Enfin, Nguyen [NGU, 10] montre que la structure poreuse du béton de chanvre et l'orientation des chènevottes apportent des différences significatives. Pour des masses volumiques apparentes sèches comprises entre 440 et 730 kg.m⁻³, la conductivité thermique dans le sens de compactage est comprise entre 0,072 et 0,118 W.m⁻¹.K⁻¹ alors que dans le sens perpendiculaire au compactage cette conductivité est en moyenne 50% supérieure.

1.3.5 Caractéristiques mécaniques

a. Caractéristiques requises

Le béton de chanvre n'assure pas un rôle porteur vis-à-vis de la structure. Il convient cependant de garantir un minimum de résistance et de rigidité à ce matériau. L'association construire en chanvre propose ainsi des valeurs minimales indiquées dans le Tableau 1.14 pour la résistance en compression et le module d'élasticité (module apparent), selon l'application visée.

MUR	Module d'élasticité (MPa)	Résistance à la compression* (MPa)
Valeur seuil (minimum) <i>en condition standard</i>	>15 MPa	>0,2 MPa

TOIT	Module d'élasticité (MPa)	Résistance à la compression* (MPa)
Valeur seuil (minimum) <i>en condition standard</i>	>3 MPa	>0,05 MPa

ENDUIT	Module d'élasticité (MPa)	Résistance à la compression* (MPa)
Valeur seuil (minimum) <i>en condition standard</i>	>20 MPa	>0,3 MPa

Tableau 1.14 Performances mécaniques minimales en fonction de l'application requises sur des échantillons stabilisés à 20°C et 50% HR [CEC, 10]

Les propriétés mécaniques du béton de chanvre sont évidemment fortement conditionnées par les propriétés du liant utilisé dans la formulation [SED,08]. Mais des éléments complémentaires, liés à la chènevotte, interagissent également. En première approche, la chènevotte peut être considérée comme une simple charge diluant le liant. Son caractère absorbant peut contribuer à modifier localement la concentration du liant en suspension et donc les résistances finales du mélange durci. De plus, selon [NOZ, 12] et [DIQ, 11], certains composés solubles de la chènevotte participent à la pénalisation des réactions d'hydratation des liants dans une zone de contact entre la chènevotte et le liant, cette zone pouvant s'étendre sur plus de 100 µm.

Le lien entre la composition du liant et les propriétés mécaniques finales du mélange durci sont donc difficiles à établir et certains développements de ce travail de thèse apporteront des éléments de discussion sur ce point.

b. Caractéristiques des liants

les liants utilisés dans la formulation de béton de chanvre sont caractérisés par des évolutions des performances mécaniques dans le temps (Figure 1.29). Ces performances sont également très influencées par les proportions d'eau mises en œuvre dans les mélanges. Une dilution trop importante pénalise ces résistances. En illustration, on peut citer les résultats de NGUYEN portant sur l'évolution des résistances de la chaux hydraulique formulée Tradical PF70 (Figure 1.30) en fonction du taux de gâchage des pâtes. Des résultats de même nature seraient obtenus avec des pâtes d'autres liants hydrauliques (ciments, plâtres...).

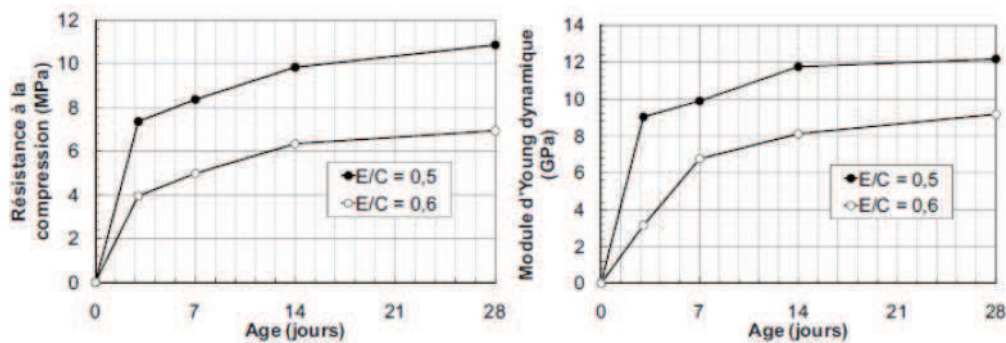


Figure 1.29 Evolution des propriétés mécaniques de deux pâtes de chaux hydraulique formulée : Tradical PF 70 (taux de gâchage de 0,5 et 0,6 [GLO, 11-1].

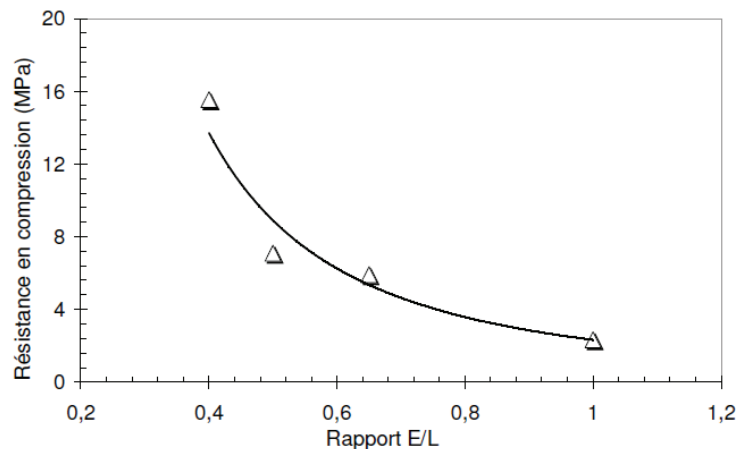


Figure 1.30 Evolution de la résistance en compression à 28 jours des éprouvettes de Tradical PF70 en fonction du rapport E/L [NGU, 10].

c. Caractéristiques des bétons de chanvre en lien avec la formulation

Cerezo [CER, 05] a réalisé des essais sur des bétons de chanvre en variant le dosage en liant. Selon elle, pour des concentrations volumiques faibles en liant, le béton de chanvre se comporte comme un empilement de particules compressibles, reliées entre elles par des « ponts » rigides de liant. En début de prise, le comportement mécanique est piloté essentiellement par le comportement de la particule. Ensuite, le liant durcit et stabilise mécaniquement la structure du matériau en limitant l'écrasement des granulats. Le matériau présente alors une résistance mécanique faible (Tableau 1.15).

Dosage en liant	Concentration volumique	ρ [kg.m ⁻³]	σ_{\max} [Mpa]	E [Mpa]	$\varepsilon_{s\max}$	ν
faible	10%	250	0,25	4	0,15	0,05
Intermédiaire	19-29%	350-500	0,35-0,80	32-95	0,05-0,06	0,08-0,16
Fort	40%	600-660	1,15	140-160	0,04	0,2

Tableau 1.15 Caractéristiques mécaniques finales du béton de chanvre [CER, 05]

Pour un dosage en liant intermédiaire, le matériau est constitué d'une particule entourée d'une épaisseur variable de liant, selon le dosage. Le durcissement du liant permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques. Ces épaisseurs variables créent un coté évolutif des propriétés. Avec un dosage fort en liant, les particules végétales sont noyées dans la matrice. Cette matrice représente une composante rigide du matériau (fort contraste entre les 2 constituants) et induit un comportement se rapprochant du liant pur.

En parallèle, la relation déformation-contrainte du mélange est affectée par la proportion de liant dans le mélange. Cette évolution est visible sur la Figure 1.31. Ces courbes permettent de récapituler l'effet de la composition sur la raideur apparente du produit, sa déformation à contrainte maximale, sa ductilité...

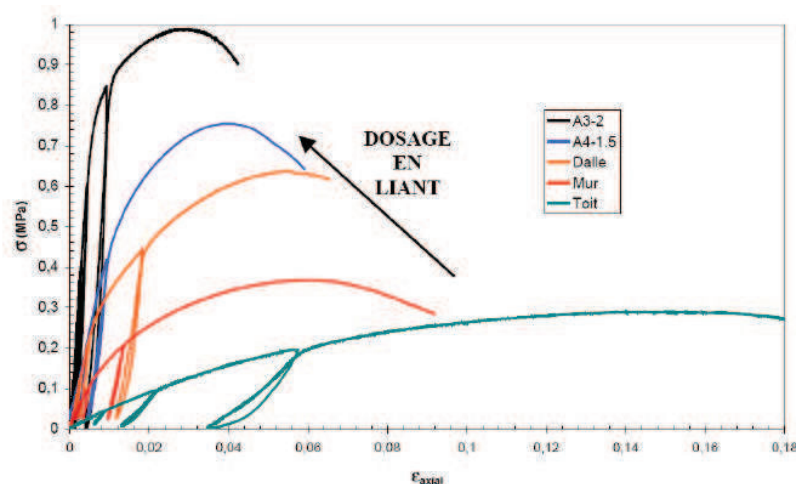


Figure 1.31 Comportement mécanique en compression du béton de chanvre à différents dosage en liant [CER, 05]

Nguyen [NGU, 10] a complété ces études en produisant les résultats obtenus en présence de béton de chanvre compacté. Les propriétés mécaniques augmentent significativement car le volume des pores diminue. Il apparait également qu'un optimum existe entre la quantité de chènevotte et la quantité de liant, le rapport L/G (Liant sur granulat) semble optimum à 2,15. De plus l'allure des courbes déformation –contraintes devient plus caractéristique d'un matériau compactant.

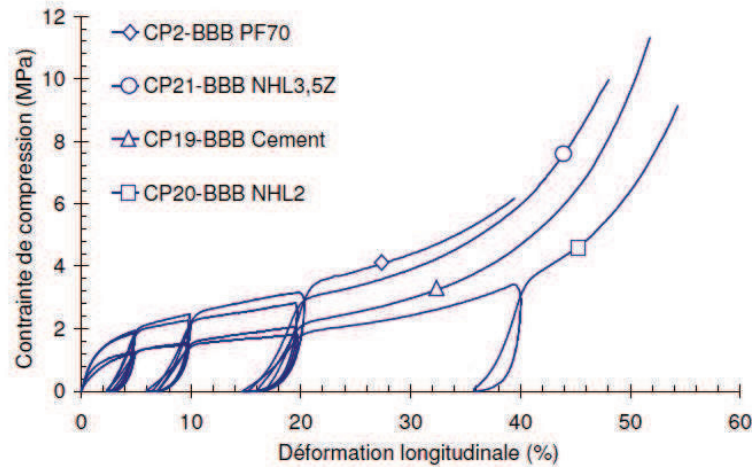


Figure 1.32 Comportement mécanique en compression à 28 jours d'éprouvettes de même composition et masse volumique initiale, confectionnées avec différents liants [NGU, 10]

Une relation évidente apparaît entre les propriétés mécaniques d'un béton de chanvre et sa masse volumique finale. A composition identique, le changement de masse volumique d'un béton de chanvre est uniquement induit par une modification de sa compaction à la mise en œuvre. Une relation entre résistance et masse volumique (à matrice solide identique) de type loi puissance est utilisée par [ELF, 08] sur la base de principe d'homogénéisation (Figure 1.33). Sur une gamme de masses volumiques plus étroite Nguyen [NGU, 10] utilise une régression linéaire (Figure 1.34).

On peut cependant noter qu'en généralisant cette approche à différentes matrices minérales poreuses Baux [BAU, 11] identifie plus aisément un modèle exponentiel (Figure 1.35).

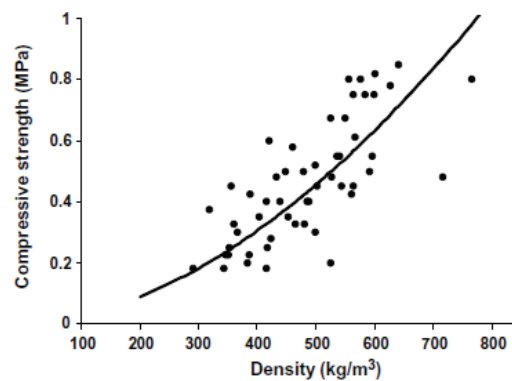


Figure 1.33 Evolutions de la résistance en compression en fonction de la masse volumique [ELF, 08]

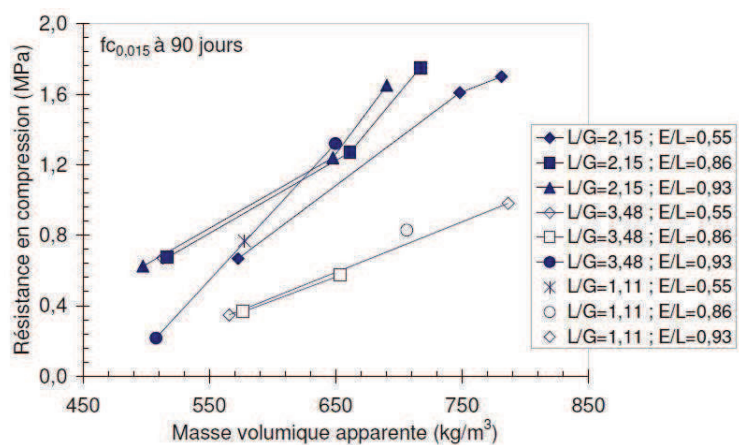


Figure 1.34 Evolution des propriétés mécaniques de bétons de chanvre [NGU, 10]

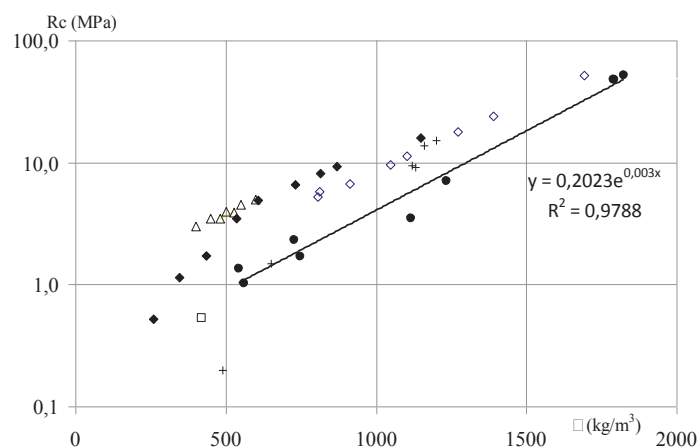


Figure 1.35 Evolutions de la résistance en compression en fonction de la masse volumique : rond : mousses CSS, losanges et croix : mousses de gypses, triangle : béton cellulaire, carré : béton de chanvre [BAU, 11]

Chapitre 2

Matériaux étudiés

2.1 Matières premières

2.1.1 Généralités

Cette thèse vient en appui du projet ANR « Bétonchanvre », réalisé en collaboration avec trois partenaires industriels :

- la société EASY Chanvre, producteur de blocs préfabriqués de béton de chanvre,
- la société SI2C, applicateur de béton de chanvre par projection,
- la société Terrachanvre, producteur de chanvre.

Les matières premières utilisées sont donc représentatives d'une exploitation industrielle. Leurs caractéristiques sont rassemblées ci-après. Certaines données relèvent de mesures réalisées au sein du laboratoire, d'autres sont produites par les différents partenaires du projet ANR Bétonchanvre (GEM IUT St Nazaire, LIMATb UBS Lorient et LGCGM IUT Rennes). Enfin, le tout est complété par des données issues de la bibliographie.

2.1.2 Liants

Les liants utilisés dans le cadre de cette thèse correspondent à des liants commerciaux. Le liant de référence pour des applications projetées (procédé SI2C) est la chaux formulée Tradical PF70, mélange de chaux aérienne, de chaux hydraulique et de pouzzolane. Le liant utilisé pour réaliser des blocs préfabriqués (Easy-Chanvre) est une chaux aérienne obtenue par extinction d'une chaux vive en mélange avec une chaux hydraulique.

Une chaux correspondant à un mélange de chaux aérienne et de chaux hydraulique est également utilisée pour formuler des enduits (tradichanvre).

Enfin, dans le cadre de formulations de laboratoire, un liant sulfaté à base d'anhydrite est utilisé (Microcem 7).

Nom	Chaux aérienne	Chaux hydraulique	Ajouts	Commentaire
Tradical PF70	75%	15%	Pouzzolane : 10%	
Tradichanvre	55,25%	9,75%	Charges minérales : 35%	65% de Tradical PF80
Microcem 7	-	-		Sulfate de Calcium

Tableau 2.1 Liants utilisés

a. Tradical PF70

Cette chaux hydraulique formulée est caractérisée par une prise hydraulique se déclarant entre 3 et 5 heures selon le taux de gâchage (Figure 2.1). L'acquisition des résistances est progressive comme indiqué dans la Figure 1.29 du chapitre 1. Les résistances à 28 jours obtenues en compression par deux auteurs [GLO, 10] et [NGU, 08] avec un tel liant sont rassemblées sur la même figure en fonction de la masse

volumique apparente théorique du mélange calculée avec une masse volumique réelle du liant hydraté mesurée de 2300 kg/m^3 .

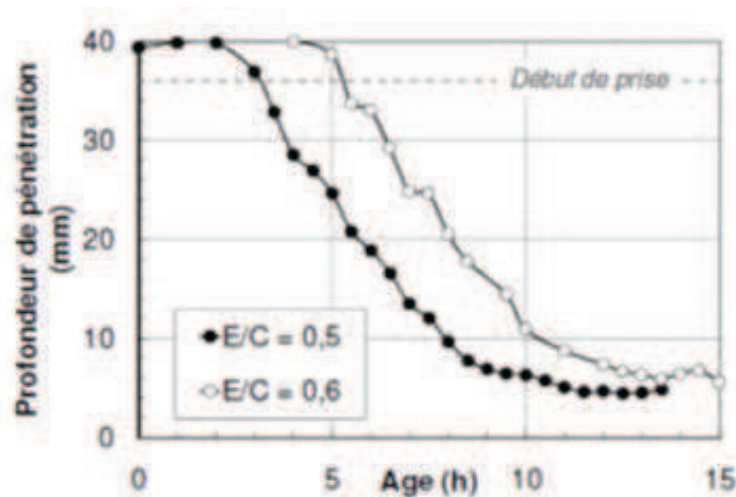


Figure 2.1 Essai de prise Vicat sur deux pâtes de chaux Tradical PF70 à 20°C [GLO,10]

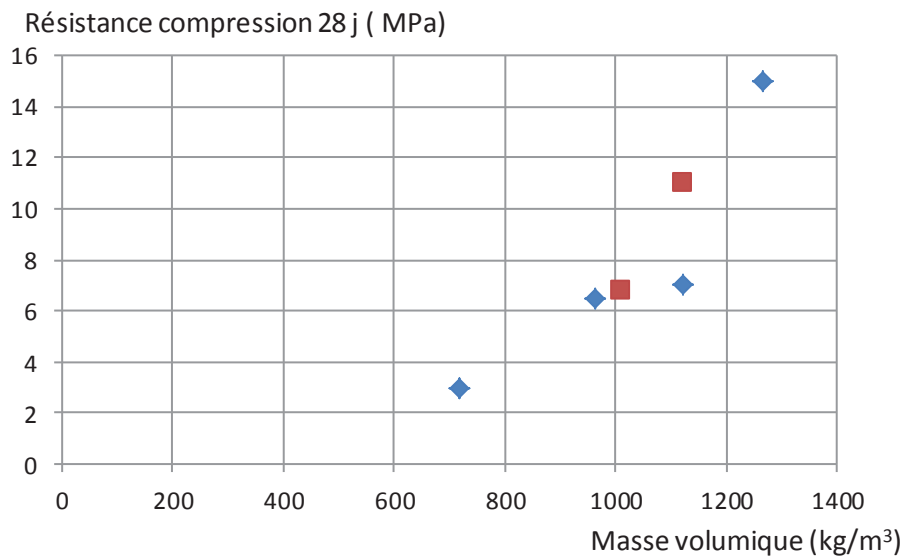


Figure 2.2 Résistance en compression à 28 j du liant Tradical PF70 (données de [GLO, 10] et [NGU, 10])

b. Tradichanvre

Le liant Tradichanvre est composé de chaux hydraulique et aérienne (Tradical PF80) ainsi que de 35% de charges minérales dont la granulométrie étagée permet d'obtenir l'enrobage et la liaison des granulats. Ce liant est principalement utilisé avec du chanvre (Chanvribat en général) pour la réalisation d'enduits à caractère isolant, intérieur et extérieur.

Les masses volumiques apparentes et réelles mesurées sont respectivement de 880 kg.m^{-3} et 2580 kg.m^{-3} .

Le Tradical PF80 a une granulométrie inférieure à $90 \mu\text{m}$, une résistance à la compression de 1 MPa et une résistance à la traction/flexion inférieure à 0,3 MPa (Données Techniques du fabricant).

c. Microcem 7

Ce liant sulfatique correspond à un mélange d'anhydrite III (50 %) et d'hémihydrate (50%) réalisé par cuisson à 450°C à partir d'un gypse naturel (pureté 93 %). Ce liant est caractérisé par une finesse importante ($d_{50} < 15 \mu\text{m}$, surface spécifique voisine de $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$) et une grande réactivité. Les grains très anguleux, se délitant en plaquette, présentent une taille voisine de $10 \mu\text{m}$. (Figure 2.3).

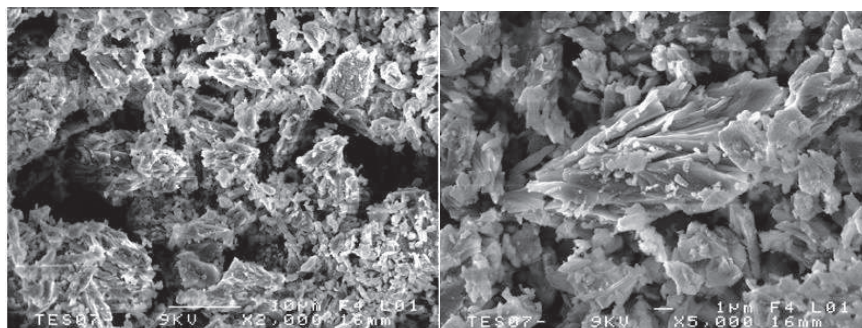


Figure 2.3 Illustration de la forme du Microcem 7

La masse volumique du Microcem hydraté correspond à celle du gypse soit 2400 kg.m^{-3} .

Le temps de prise de ce liant est très rapide (typiquement 3 minutes pour un taux de gâchage de 1). Ce liant est donc couplé à un ralentisseur de prise traditionnel (Retardant P –Tricosal).

Le produit d'hydratation de ce liant est un gypse à petits cristaux dont les propriétés physiques restent similaires à celles d'un gypse issu de plâtre : solubilité importante, résistance directement liée à la compacité de la matrice (Figure 2.4).

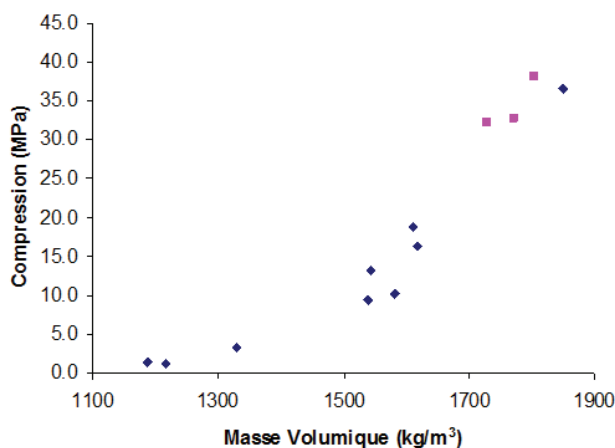


Figure 2.4 Variation des résistances à la compression du liant Microcem 7 en fonction de la masse volumique du produit durci (résultats obtenus en faisant varier le taux de gâchage). [ARA, 12]

2.1.3 Chènevottes

Les différentes chènevottes utilisées dans le cadre de cette thèse sont des produits commerciaux. Elles peuvent être fibrées (Terrachanvre de deux grades) ou non (Chanvribat). S'ajoute à cette liste de la chènevotte traitée. Cette chènevotte correspond à de la chènevotte commerciale Chanvribat qui a été traitée en laboratoire, par immersion dans un produit hydrofuge. L'objectif est de modifier les capacités d'absorption de la chènevotte en jouant sur ses propriétés de mouillage.

Nom	Type	Utilisations
Chanvribat	Défibré	Mur, Dalle, Enduit, Toiture
Terrachanvre F	Défibré	Enduit principalement
Terrachanvre I	Fibré	Mur, Dalle, Toiture
Chanvribat Traité	Défibré	Mur

Tableau 2.2 Chènevottes utilisées

L'étude granulométrique des chènevottes a été réalisée par tamisage mécanique en utilisant des tamis standards à maille carrée. La Figure 2.5 synthétise l'ensemble des résultats.

Les granulométries des chènevottes Terrachanvre I et Chanvribat sont très voisines. Ces chènevottes sont largement plus grandes que la Terrachanvre F utilisée pour les enduits.

Les courbes obtenues correspondent en fait à la distribution granulométrique des largeurs des brins qui présentent une forme parallélépipédiques.

Le diamètre moyen (D50) est de 4 mm pour la Terrachanvre I et Chanvribat et de 2 mm pour la Terrachanvre F.

Le rapport de longueur/largeur des chènevottes Terrachanvre I et Chanvribat reste voisin de 4 comme l'indiquent les analyses granulométriques par traitement d'images [NGU, 10].

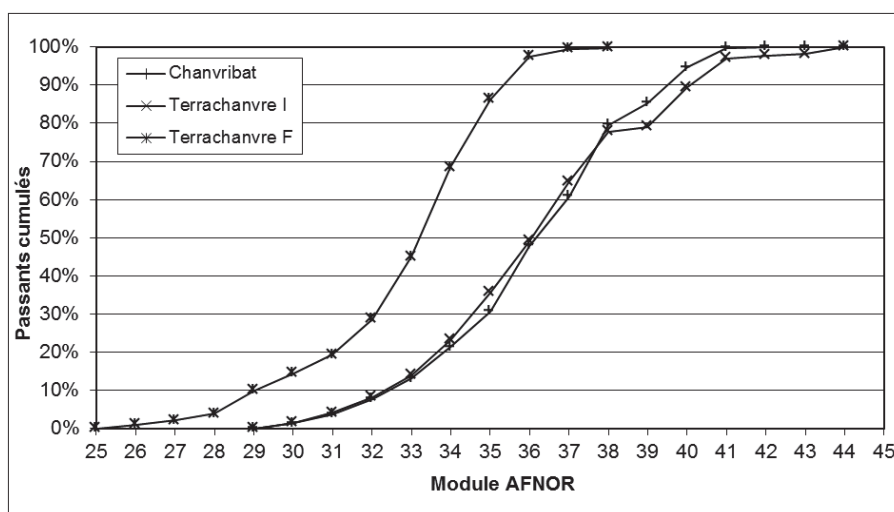


Figure 2.5 Courbes granulométriques de différentes chènevottes (Publié dans [GLO, 10])

Les masses volumiques apparentes et réelles mesurées des chènevottes en vrac sont indiquées dans le Tableau 2.3.

	$\rho_{app} [kg.m^{-3}]$	$\rho_{reel} [kg.m^{-3}]$	n
Chanvribat Traité	130	1389,46	90,6%
Chanvribat	110	1383,83	92,1%
Terrachanvre I	100	1335,20	92,5%

Tableau 2.3 Propriétés des Chènevottes

L'évaluation d'une masse volumique apparente des brins de chènevotte (sans inclure la porosité interparticulaire) reste difficile à mesurer [CER 05]. On peut estimer cette valeur à $250 kg.m^{-3}$. Cette caractéristique n'a pas fait l'objet de mesures plus précises en présence de chènevotte fibrée ou non.

2.2 Matériaux produits par les partenaires industriels

Dans un premier temps, l'étude porte sur des formulations habituellement utilisées par ces partenaires. Il s'agit de formulations de type mur, dalle et toit ainsi que d'enduits.

Pour l'ensemble des formulations, les éprouvettes ont été fabriquées dans des moules en contreplaqué bakélinisé de forme parallélépipédique de dimension 30x30x16 cm³. Pour les enduits Terrachanvre, les moules ne sont pas remplis sur toute la hauteur mais sur 12 cm seulement.



Figure 2.6 Alvéoles utilisées lors de la fabrication

2.2.1 Béton de chanvre projeté (Partenaire SI2C)

a. Procédé de mise en œuvre

La mise en œuvre par projection permet de limiter les étapes de coffrage. Le béton de chanvre est alors projeté sur un coffrage provisoire ou perdu ou sur un mur existant (rénovation). La face non coffrée est réglée et travaillée manuellement. Le matériel nécessaire à la mise en œuvre associe un malaxeur, un distributeur de prémix sec qui sera transporté dans un tube de large section par de l'air comprimé. Une alimentation en eau est réalisée (pompe alimentant à 13 bars des buses coniques pulvérisant l'eau sur le mélange en suspension dans l'air). La zone de mélange du fluide avec le prémix sec correspond aux 3 ml terminaux du tuyau. Du mélange neuf est couplé avec un recyclage de matériau humide (issu du rebond et de l'égalisation des surfaces). Ceci fait que le dosage précis du produit appliqué n'est pas facile à identifier. L'ajout d'eau est réglé par l'opérateur à la lance (Figure 2.7).

Lors de la confection des blocs, les moules sont disposés de façon à se rapprocher des conditions de projections usuelles. Pour les formulations de type mur, les alvéoles sont placées contre un mur. Le remplissage se fait colonne par colonne de bas en haut. Les alvéoles sont surfacées (taloche à pointes), puis fermées (Figure 2.8).

Pour la formulation de type « Dalle », les alvéoles sont remplies horizontalement reproduisant la mise en place sur site. Enfin, pour la formulation de type « Toit », les alvéoles sont remplies avec une inclinaison (Figure 2.9 et Figure 2.10).



Figure 2.7 Mise en œuvre – SI2C 2007



Figure 2.8 Mise en œuvre de la Formulation de type « Mur »



Figure 2.9 Formulation de type « Dalle » – SI2C 2007



Figure 2.10 Formulation de type « Toit » – SI2C 2007

b. Formulations

Trois formulations de béton de chanvre projeté sont testées (Tableau 2.4) : La composition de référence (SI2C-R) correspondant à la formulation utilisée pour la fabrication des éléments de type « mur », la formulation dalle et la formulation toit.

Formulation	Abréviation	Liant	Chanvre
Référence (mur)	SI2C R	Tradical BCB PF70 : 44 kg	Chanvribat : 22 kg
Dalle	SI2C-D	Tradical BCB PF70 : 55 kg	Chanvribat : 22 kg
Toit	SI2C-T	Tradical BCB PF70 : 22 kg	Chanvribat : 22 kg

Tableau 2.4 Formulations des bétons de chanvre projetés

2.2.2 Blocs préfabriqués (Partenaire Easy-Chanvre)

a. Procédé de mise en œuvre

Le site industriel EASY CHANVRE présente une chaîne de fabrication de blocs associant une unité de fabrication du mélange, une unité de moulage et une aire de stabilisation et séchage.

Le chanvre est livré en vrac et est exposé aux conditions hygrothermiques ambiantes. Il alimente ensuite un silo (partie bardage en bois - Figure 2.11) depuis lequel il est repris par une vis sans fin. Il est alors criblé (à 5 mm environ) afin d'évacuer les petites fibres, les poussières.



Figure 2.11 Stockage chènevotte - Easy-Chanvre 2007

Deux silos de stockage de pulvérulents sont implantés. L'un correspond à une chaux vive aérienne. Cette chaux aérienne est éteinte par ajout d'eau dans une citerne placée en pied de silo. Un brasseur permet d'homogénéiser le mélange. Un contrôle de température de la citerne permet de réguler l'alimentation en eau. La température de la pâte de chaux ne dépasse pas 60 °C. La chaleur induite par l'hydratation de la chaux vive permet de chauffer l'ensemble de l'installation et contribue au séchage des blocs.

Le second silo contient une chaux hydraulique. La chaux hydraulique permet de créer un durcissement après les premières heures. Elle permet également de contrôler la rhéologie du mélange frais, captant au malaxage une partie de l'eau apportée par la chaux en pâte.

Le dosage est de 122 kg de chaux vive (plus son eau d'hydratation) complétée par la chaux hydraulique de façon à obtenir un dosage total en chaux de 160 kg.m^{-3} (apparent du produit compacté) de mélange.



Figure 2.12 Le liant – Easy-Chanvre 2007

La pâte de chaux, la chaux hydraulique, les ajouts et le chanvre criblé sont introduits dans un mélangeur bi-vis contrarotatives. Le mélange est alors transporté vers la mouleuse. (Figure 2.13)



Figure 2.13 Mélangeur – Easy-Chanvre 2007

La mouleuse est constituée d'une trémie dotée d'une déchiqueteuse qui alimente par le dessus les moules. Les moules sont remplis sous vibration (transmise à la caisse du moule alors que les noyaux restent fixes).

Le moule est ensuite arasé et translaté vers la démouleuse. Le fond est ripé et remplacé par un caillebotis. Les noyaux sont évacués par le dessus en maintenant le produit par un masque.

Les blocs sont ensuite convoyés vers une unité de stockage en étages. Après durcissement et début de carbonatation, les blocs sont repris par un robot de manutention pour être palettisés (maturation totale de 28 jours).



Figure 2.14 Zone de stockage – Easy-Chanvre 2007

Les blocs utilisés lors de la fabrication des murs présentent des réservations pour l'ossature bois ($18 \times 8 \text{ cm}^2$) ainsi que des réservations pour le passage de réseaux ($\varnothing 5 \text{ cm}$). La section de l'ossature est de $15 \times 5 \text{ cm}^2$. L'espace entre les blocs de béton de chanvre et l'ossature est rempli d'un lait de chaux. L'inclusion de l'ossature bois au sein des blocs permet de créer un contreventement.

Les masses volumiques du produit fini sont voisines de 325 kg.m^{-3} . La résistance en compression est de 0,4 MPa.



Figure 2.15 Bloc de béton de chanvre – Easy-Chanvre 2007

b. Formulations

La composition de référence (EASY-R) correspond à la formulation des blocs utilisés pour les murs. La Variante 1 (EASY-V1) correspond à la formulation utilisée pour les dalles. La Variante 2 (EASY-V2) est plus chargée en chaux hydraulique. L'objectif de la société EASY CHANVRE est d'utiliser celle-ci pour faire des hourdis porteurs (la chaux hydraulique ayant une meilleure adhérence sur le bois que la chaux aérienne). Les formulations sont données dans le Tableau 2.5.

Formulation	Abréviation	Liant	Chanvre
Référence (mur)	Easy-R	chaux vive : 415 kg chaux hydraulique : 158 kg	3400 l
Variante 1	Easy-V1	chaux vive : 450 kg chaux hydraulique : 225 kg mélasse/levure : 125 l	3400 l
Variante 2	Easy-V2	chaux vive : 450 kg chaux hydraulique : 375 kg	3400 l

Tableau 2.5 Formulations de blocs préfabriqués

La masse volumique apparente obtenue par la société EASY CHANVRE pour la formulation de référence est, habituellement, de l'ordre de 325 kg.m^{-3} .

2.2.3 Blocs Moulés – Chanvre fibré (Partenaire Terrachanvre)

a. Procédé de mise en œuvre

La mise en œuvre du béton de chanvre avec du chanvre fibré était initialement prévue par projection. Cependant, les fibres forment des pelotes qui obstruent la trémie d'alimentation de la machine, la projection devient impossible : la chaux se sépare de la fibre. Le malaxage est réalisé à la bétonnière. Le remplissage des alvéoles est réalisé manuellement.

b. Formulations

La composition Référence Terrachanvre (RT-091007) correspond à une formulation de type « mur ». Elle est constituée de 22kg de chanvre Terrachanvre M et 44kg de chaux Tradical BCB PF70



Figure 2.16 Malaxage du béton de chanvre fibré « Référence Terrachanvre »

2.2.4 Enduits

a. Procédé de mise en œuvre

Deux types d'enduit sont étudiés. Le malaxage est réalisé à la bétonnière, Le dosage en eau est ajusté par l'opérateur. Les moules sont remplis manuellement et lissés sur la face non coffrée.



Figure 2.17 Fabrication des blocs d'enduit

b. Formulations

La première composition correspond à un mélange de chaux Tradichanvre avec de la chènevotte chanvribat : (Enduit Chanvribat). Elle correspond à la formulation utilisée par la société SI2C. La deuxième composition est réalisée avec du chanvre Terrachanvre F (Enduit Terrachanvre). (Tableau 2.6)

Formulation	Abréviation	Liant	Chanvre
Enduit Chanvribat	Enduit C	Tradichanvre BCB : 75kg	Chanvribat : 11kg
Enduit Terrachanvre	Enduit T	Tradichanvre BCB : 75kg	Terrachanvre F : 11kg

Tableau 2.6 Formulations des enduits

2.3 Matériaux développés en laboratoire

Afin d'améliorer la résistance mécanique du béton de chanvre au jeune âge, de nouvelles formulations ont été proposées. Ces formulations reposent notamment sur la substitution de Microcem 7 au Tradical PF 70 et sur un traitement hydrofuge des chènevottes. En effet, la résistance mécanique du béton de chanvre se développe essentiellement au cours des premières semaines de maturation. Elle est notamment liée à la teneur en eau initiale du matériau.

2.3.1 Procédé de mise en œuvre

Les formulations développées en laboratoire sont réalisées bloc par bloc. Le liant et l'eau sont d'abord mélangés dans un malaxeur. Un fluidifiant et un retardateur sont ajoutés dans le cas des formulations contenant du microcem. Le fluidifiant permet une meilleure mise en œuvre du liant lors de l'addition du chanvre et le retardateur permet de retarder le durcissement du liant pour assurer une mise en œuvre aisée. Une fois le mélange de pâte homogène, la chènevotte est ajoutée petit à petit. Le béton de chanvre est alors moulé et compacté sous une charge constante.

2.3.2 Formulations avec variantes de liant

Les formulations avec variantes de liant sont basées sur la formulation de référence SI2C de type Mur. La composition du liant est modifiée par substitution d'une part de tradical PF70 par du Microcem 7. En effet, ce liant sulfaté permet un développement rapide des propriétés mécaniques (Figure 2.18) et présente des propriétés hydriques intéressantes. La cinétique de prise et durcissement se développe avant les 10 premiers jours. Au-delà de 100 jours une progression des résistances est certainement à relier à un effet de carbonatation de la portlandite.

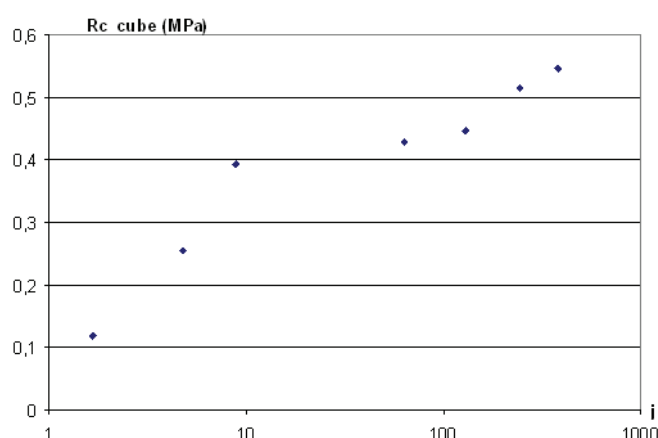


Figure 2.18 Evolution des résistances à la compression en fonction du temps (jours) de blocs de béton de chanvre formulé selon la composition Laboratoire F1

Formulation	Abréviation	Liant	Chanvre
Laboratoire 1	Labo-F1	Tradical BCB PF70 : 12,40 kg Microcem 7 : 6,20 kg	Chanvribat : 9,30 kg
Laboratoire 3	Labo-F3	Tradical BCB PF70 : 9,30 kg Microcem 7 : 9,30kg	Chanvribat : 9,30 kg
Laboratoire 4	Labo-F4	Tradical BCB PF70 : 6,20 kg Microcem 7 : 12,40 kg	Chanvribat : 9,30 kg

Tableau 2.7 Formulations de bétons de chanvre avec variantes de liant

Pour l'ensemble de ces formulations, la quantité d'eau de gâchage est de 15,4 kg, ce qui conduit à un rapport E/L de 0,83. Le rapport G/L est de 0,5 comme pour une formulation de référence « mur ».

2.3.3 Formulations avec variantes de chènevottes

a. Compositions

Deux formulations avec variantes de chènevottes sont proposées : l'une avec du chanvre fibré terrachanvre et un liant modifié, l'autre avec du chanvre hydrofugé et du liant tradical BCB PF70. Le traitement du chanvre est présenté par la suite.

Formulation	Abréviation	Liant	Chanvre
Laboratoire 2	Labo-F2	Tradical BCB PF70 : 12,40 kg Microcem 7 : 6,20 kg	Terrachanvre M: 9,30 kg
Laboratoire Chanvre traitée	Labo BCT	Tradical BCB PF70 : 18,60 kg	Chanvribat hydrofugé : 9,30 kg

Tableau 2.8 Formulations de bétons de chanvre avec variantes de chènevottes

Pour l'ensemble de ces formulations, la quantité d'eau de gâchage est de 15,4 kg, ce qui conduit à un rapport E/L de 0,66. Le rapport G/L est de 0,5 comme pour une formulation de référence « mur ».

b. Traitement des chènevottes

+ Généralités

Afin de réduire la quantité d'eau de formulation, nous envisageons de réduire le caractère hydrophile de la chènevotte. A cette fin, deux types de traitements hydrofuges sont envisageables.

Le traitement thermique est un traitement global à haute température (entre 180 et 250°C) [REP,06]. Les composés biochimiques de la chènevotte réagissent à la chaleur ce qui modifie leurs caractéristiques physiques [VER, 01]. Ces changements dépendent, plus particulièrement, du niveau de température et de la durée du traitement [KOR, 08]. Les hémicelluloses se dégradent ce qui réduit le caractère hydrophile et rend la chènevotte moins sujette aux variations dimensionnelles [PEJ, 08]. La chènevotte durcit par la réticulation des lignines. La modification de la structure cristalline de la cellulose altère les performances mécaniques (flexion, cisaillement, etc.) et les propriétés thermiques (conductivité thermique). Par contre une augmentation des dégradations

biologiques (champignons, insectes, à l'exception des termites), une mauvaise tenue aux UV et une diminution des propriétés de flexion, d'écrasement radial et de résistance aux chocs sont constatées [VER, 01].

L'application d'un hydrofuge compatible sur la chènevotte constitue la deuxième méthode. Différents produits de traitement sont disponibles. Certains forment des films tapissants imperméables à l'eau. En général, le traitement empêche ou retarde très fortement le gonflement de la cellulose, protège des moisissures tout en laissant respirer le support car le traitement est microporeux. Ce type de traitement permet de traiter également en profondeur. Modifier par traitement les conditions de mouillage constitue une solution intéressante car ceci peut également contribuer à modifier l'absorption par capillarité de la chènevotte. C'est ce type de traitement qui est retenu pour la suite de l'étude.

+ Choix du produit

Le produit doit être compatible par son mode de fonctionnement et son accrochage avec la chènevotte et la chaux. Il doit donc s'adapter à un pH élevé. Afin de ne pas altérer le transfert thermo-hydrique au sein du béton de chanvre, le traitement ne doit pas modifier la perméabilité aux gaz de la chènevotte. Le produit de traitement retenu dans cette étude est hydrofuge et oléofuge. Le produit hydrofuge sélectionné est formulé sur la base d'un copolymère acrylique fluoré. Il est dilué dans l'eau. Le squelette acrylique est caractérisé par quatre groupes latéraux. Un groupe fluoré apporte le caractère hydrophobe. Cette propriété est due à l'atome de fluor qui développe peu d'interactions avec les autres éléments chimiques. Un groupe cationique permet la solubilité du polymère dans l'eau ainsi qu'une bonne liaison avec le support minéral. Cette liaison est renforcée par le groupe silane qui apporte une meilleure affinité avec le support et crée des liaisons chimiques et une meilleure durabilité du traitement. Le groupe non ionique, nécessaire à la mise en œuvre du traitement, permet l'organisation des chaînes fluorées à la surface du matériau.

Les atomes de fluor diminuent l'énergie de surface en conférant à la couche de traitement une tension superficielle basse.

La loi de Young et l'équation de Jurin donnent :

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cos(\theta) \quad [E 2.1]$$

$$\Delta P = \frac{2 \gamma_{LV} \cos(\theta)}{r} \quad [E 2.2]$$

γ_{SV} la tension superficielle entre le solide et l'air, soit 10 à 15 mN.m⁻¹ pour un copolymère acrylique fluoré,

γ_{LV} la tension superficielle entre le liquide et l'air : 72 mN.m⁻¹ pour l'eau,

γ_{SL} la tension interfaciale entre le liquide et le solide,

θ l'angle de raccordement entre le liquide et le solide,

r le rayon du canal,

ΔP la différence de pression entre le gaz et le liquide situé de part et d'autre du ménisque.

De l'équation et des tensions superficielles connues, il est facile de constater que l'angle θ satisfaisant l'équation est forcément supérieur ou égal à 90°. Cet angle induit une différence de pression ΔP négative ou nulle : avec un tel traitement, l'eau ne

peut plus remonter par capillarité. Sans pression exercée sur l'eau, la chènevotte est théoriquement rendue hydrophobe.

+ Application

Pour réaliser le traitement des fibres, deux protocoles et bancs expérimentaux ont été mis en place. Le premier protocole est un traitement par immersion simple des chènevottes dans une solution imperméabilisante diluée (la concentration est ajustable).

Les chènevottes sont placées dans un contenant lesté permettant la libre circulation de l'eau tout en bloquant les particules de chanvre. Le produit de traitement en solution est introduit jusqu'à immersion complète des chènevottes pendant 24h (Figure 2.19(a)). La saturation des chènevottes étant obtenue classiquement après quelques minutes d'immersion, une durée d'immersion inférieure à 24 h aurait pu être suffisante.

Un deuxième protocole a été mis en place pour faciliter la pénétration de l'hydrofuge au sein de la chènevotte. Le traitement est appliqué par immersion sous vide. Le contenant lesté et les chènevottes sont placés dans l'enceinte. Une fois le vide établi, le produit de traitement est introduit jusqu'à immersion complète des chènevottes. L'immersion est également maintenue pendant 24 h (Figure 2.19 (b)).

Après traitement, la chènevotte est placée dans une étuve à 50°C pendant 24h. Pour évaluer l'effet de la dilution du traitement dans l'eau, cinq concentrations sont étudiées : 2%, 5%, 10%, 15% et 20% de matière active (% massiques).

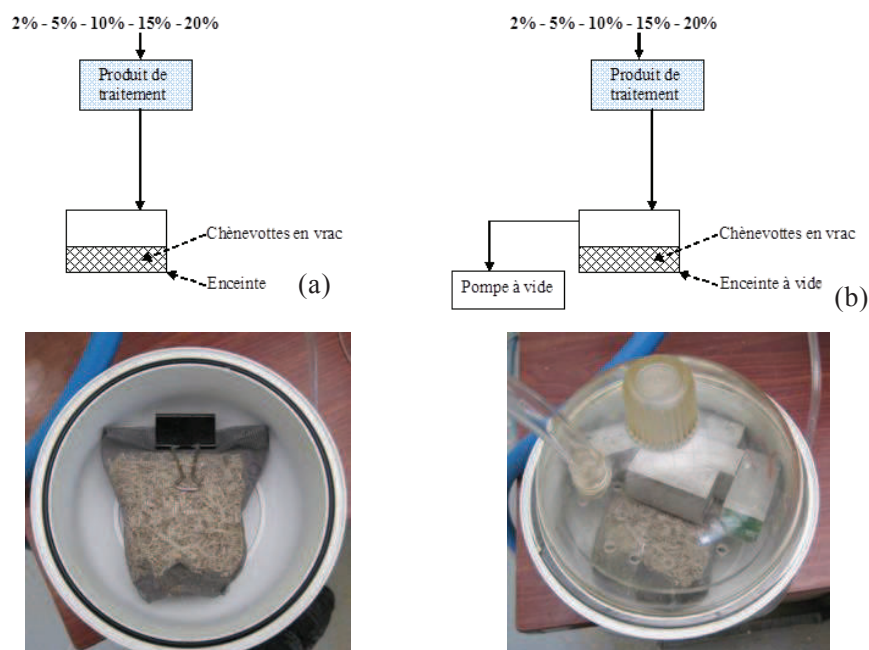


Figure 2.19 Protocole de traitement par immersion (a) et sous vide (b)

+ Résultats : absorption d'eau

La Figure 2.20 présente l'évolution de la prise de masse en fonction du temps lors du test de mouillage de chènevottes non traitées selon la méthode décrite en Annexe I.

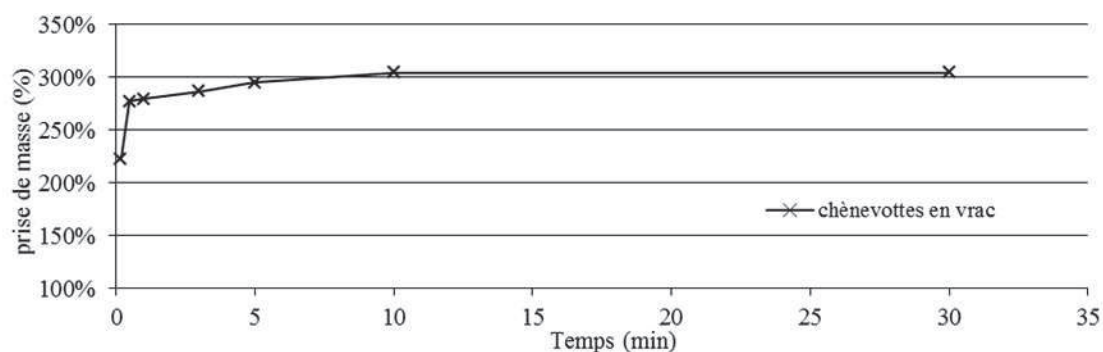


Figure 2.20 Evolution de la masse de la chènevotte immergée dans l'eau en fonction du temps

Le test réalisé sur des fibres non traitées montre une prise de masse rapide : 270% après 30 secondes d'immersion et 300 % après 30minutes ce qui est en accord avec les résultats obtenus par Nguyen [NGU, 10].

La Figure 2.21 présente les évolutions des prises de masse en fonction du temps de fibres traitées à différentes concentrations (0%, 2%, 5%, 10%, 15% et 20%).

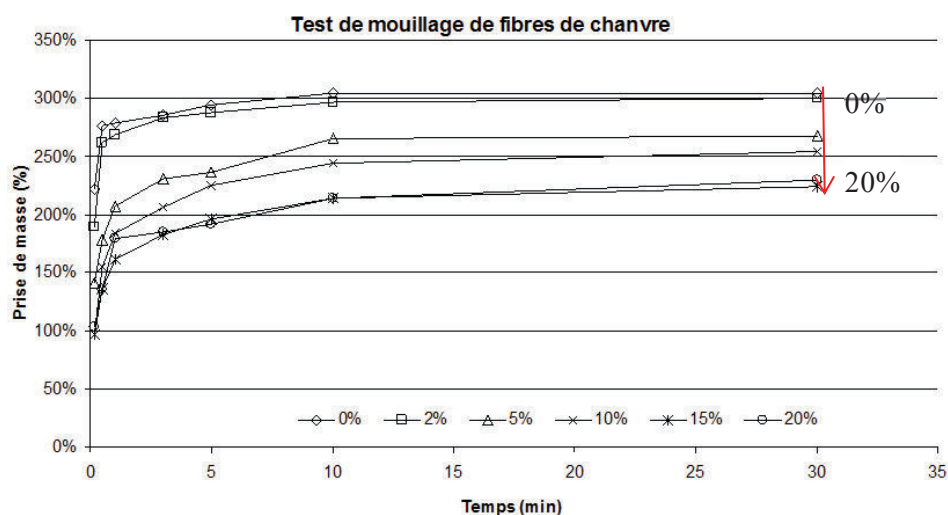


Figure 2.21 Evolution de la prise de masse de la chènevotte immergée dans l'eau en fonction du temps et pour différentes concentrations du produit de traitement appliqué par immersion simple

Plus la concentration en imperméabilisant est forte plus la prise en masse des chènevottes est faible. La différence de prise de masse réalisée entre une chènevotte non traitée et une chènevotte traitée avec une concentration de 20% est de 84% soit un gain relatif de 27% par rapport à une fibre non traitée (Tableau 2.9). A forte concentration (15% et 20%), les évolutions sont très semblables. A faible concentration (2%), le gain est négligeable.

La Figure 2.22 présente l'évolution de la prise de masse relative à la masse finale en fonction du logarithme du temps des différentes concentrations étudiées.

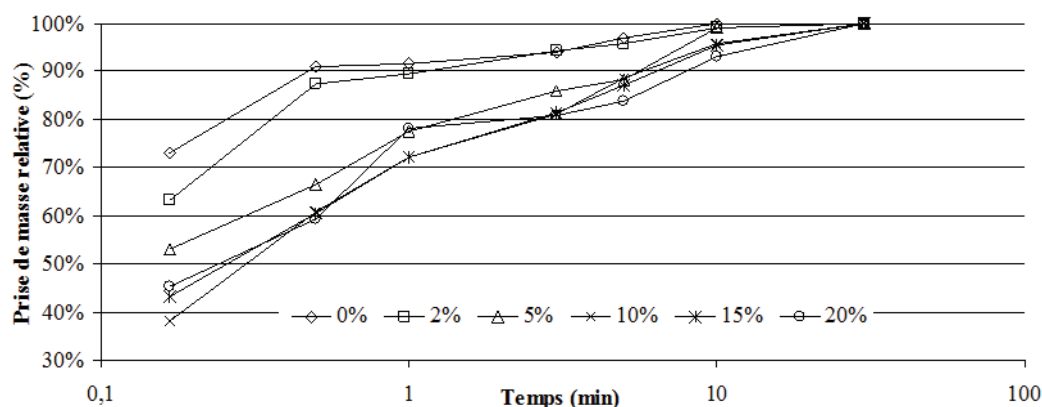


Figure 2.22 Evolution de la prise de masse relative de la chènevotte immergée dans l'eau en fonction du logarithme du temps et pour différentes concentrations du produit de traitement appliqué par immersion simple

Les courbes montrent que les évolutions des prises de masse relatives sont similaires et quasiment confondues pour les concentrations allant de 5 à 20%. Ces évolutions montrent qu'un maximum d'efficacité ressortirait pour une concentration de matière active de 5%, ce qui est visible sur la Figure 2.23 présentant l'évolution du rapport gain sur concentration en fonction de la concentration.

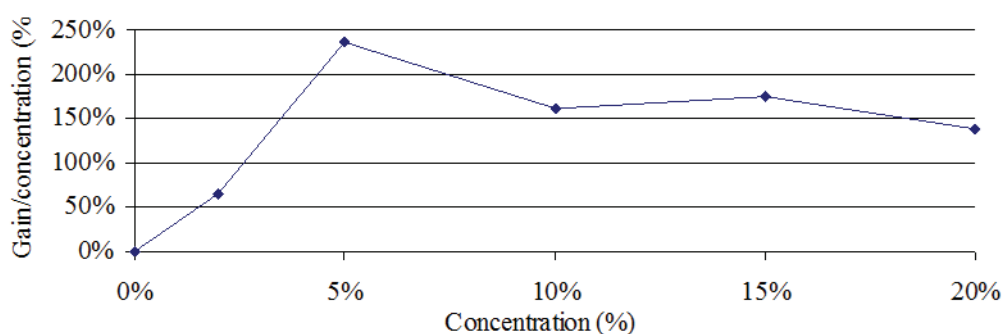


Figure 2.23 Evolution du gain sur la concentration en fonction de la concentration du produit de traitement appliqué par immersion simple

Au-delà de 5%, il n'y a plus de diminution significative de la quantité d'eau absorbée par les chènevottes (Figure 2.21). Une concentration de 5% est un bon compromis entre un maximum d'efficacité et le coût de traitement.

Le Tableau 2.9 récapitule les résultats des tests de mouillage sur des fibres traitées par immersion simple et par immersion sous vide, pour différentes concentrations, à une échéance de 30 minutes.

Une fibre traitée à 2% par immersion simple absorbe 3 fois sa masse en eau alors qu'une fibre traitée à 2% par immersion sous vide absorbe 2,38 fois sa masse soit un gain de 21%. La mise sous vide apporte donc une amélioration sensible à l'efficacité du traitement.

Le gain d'une fibre traitée à 2% sous vide est de 22% (par rapport à une fibre non traitée) ce qui est équivalent à une fibre traitée par immersion simple avec une concentration de 10-15%.

Le traitement sous vide avec une concentration de 2% est la solution retenue pour la suite de l'étude.

	prise de masse relative par immersion simple (%) - (gain par rapport à une fibre non traitée)	
Concentration	Traitement par immersion simple [% - (gain en %)]	Traitement par immersion sous vide [% - (gain en %)]
0 %	304	-
2 %	300 – (-1%)	238 – (-22%)
5 %	268 – (-12%)	236 – (-22%)
10 %	255 – (-16%)	233 – (-23%)
15 %	224 – (-26%)	230 – (-24%)
20 %	220 – (-27%)	228 – (-25%)

Tableau 2.9 Comparaison des résultats du test de mouillage en fonction des procédés de traitement et de la concentration du produit de traitement à 30 minutes

Des observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) ont été réalisées afin d'analyser les conditions d'enrobage de la surface de la chènevotte par le produit de traitement. La Figure 2.24 (a) correspond à une coupe réalisée dans le sens transversal de chènevotte traitée par immersion simple (concentration 5%) alors que la Figure 2.24 (b) correspond à un traitement sous vide (concentration 5%).

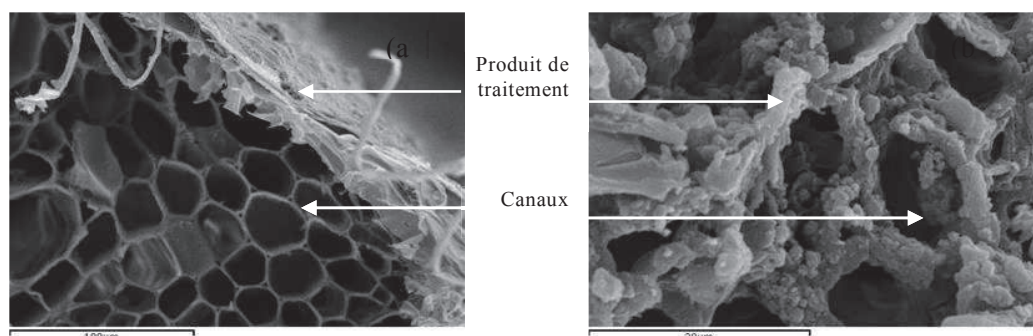


Figure 2.24 Coupes transversales d'une chènevotte traitée (5%) par simple immersion (a) ; sous vide (b)

Ces observations permettent de constater que le traitement pénètre difficilement dans les canaux de la chènevotte lors du traitement par simple immersion et se dépose essentiellement à la surface extérieure des chènevottes (Figure 2.24 (a)). La Figure 2.24 (b) montre quant à elle que la surface des canaux est mieux enrobée par le produit de traitement. Ces constatations sont en concordance avec les résultats des tests de mouillages.

L'effet hydrophobe du traitement est donc bien sensible sur la paroi des chènevottes par contre, la limitation de la pénétration d'eau par capillarité n'est pas très sensible, ce qui se traduit par des captages d'eau qui restent importants lors des tests de mouillage. Cependant, le traitement permet de réduire les cinétiques de mouillage. En conséquence, en présence de procédé de mise en œuvre caractérisé par des temps de process courts (projection, compactage) une réduction substantielle de la teneur en eau reste accessible.

La rémanence du traitement après application du béton de chanvre laisse entrevoir également un rôle actif du traitement sur le comportement hydrique.

2.3.4 Bilan

Dans le tableau suivant (Tableau 1.1), l'ensemble des formulations réalisées a été récapitulé. On peut retrouver les quantités et types de chanvre, liant et ajouts éventuels utilisés.

La masse volumique réelle théorique est également calculée.

Société		Abréviation	Fabrication	Nb Blocs	Chênevotte		Liant		Eau (kg)	E/C	L/G	Chaux/M _{liant}
					Nom	Masse (kg)	Nom	Masse (kg)				
SI2C	Référence	SI2C - R	09/10/2007	37	Chanvribat	22	Tradical T70	44	-	-	2,00	1
	Dalle	SI2C - D	09/10/2007	9	Chanvribat	22	Tradical T70	55	-	-	2,50	1
	Toiture	SI2C - T	09/10/2007	9	Chanvribat	22	Tradical T70	22	-	-	1,00	1
	Enduit Chanvribat	Enduit C	09/10/2007	-	Chanvribat	11	Tradichanvre	75	-	-	6,82	1
	Enduit Terrachanvre	Enduit T	09/10/2007	-	Terrachanvre F	11	Tradichanvre	75	-	-	6,82	1
Terrachanvre	Référence	Ter - Ref	09/10/2007	9	Terrachanvre I	22	Tradical T70	44	-	-	2,00	1
Easy-Chanvre	Référence	EASY - R	30/10/2007	50	-	340	-	573	-	-	1,69	1
	Variante 1	EASY - V1	30/10/2009	10	-	340	-	675	-	-	1,99	1
	Variante 2	EASY - V2	30/10/2009	10	-	340	-	825	-	-	2,43	1
Laboratoire	Formulation 1	LABO F1	11/02/2009	10	Chanvribat	9,3	Tradical PF70	12,4	15,42	0,83	2,00	0,67
							Microcem 7	6,2				
	Formulation 2	LABO F2	13/02/2009	7	Terrachanvre M	6,51	Tradical PF70	8,68	10,79	0,83	2,00	0,67
							Microcem 7	4,34				
	Formulation 3	LABO F3	11/02/2009	10	Chanvribat	9,3	Tradical PF70	9,3	15,42	0,83	2,00	0,50
							Microcem 7	9,3				
	Formulation 4	LABO F4	11/02/2009	10	Chanvribat	9,3	Tradical PF70	6,2	15,42	0,83	2,00	0,33
							Microcem 7	12,4				
	Formulation 2 Carbonatée	LABO FLC	11/02/2009	3	Terrachanvre M	2,79	Tradical PF70	3,72	4,63	0,83	2,00	0,67
							Microcem 7	1,86				
	Formulation Chanvre Traité	LABO BCT	16/03/2011	5	Chanvribat Traité	4,65	Tradical PF70	9,3	6,14	0,66	2,00	1,00

Tableau 2.10 Récapitulation des formulations, des compositions et du nombre de blocs

Société	Nom Formulation	E/C	L/G	Chaux/M _{liant}	ρ réel théorique
SI2C	SI2C - R	-	2,00	1	1997
	SI2C - D	-	2,50	1	2063
	SI2C - T	-	1,00	1	1798
	Enduit C	-	6,82	1	2399
	Enduit T	-	6,82	1	2380
Terrachanvre	Ter. Ref	-	2,00	1	1963
Easy-Chanvre	EASY - R	-	1,69	1	1947
	EASY - V1	-	1,99	1	1995
	EASY - V2	-	2,43	1	2054
Laboratoire	LABO F1	0,83	2,00	0,67	1974
	LABO F2	0,83	2,00	0,67	1940
	LABO F3	0,83	2,00	0,50	1962
	LABO F4	0,83	2,00	0,33	1951
	LABO FLC	0,83	2,00	0,67	1951
	LABO BCT	0,66	2	1	2001

Tableau 2.11 Compositions des formulations

Chapitre 3

Méthodes expérimentales et analyses

3.1 Préparation des échantillons

3.1.1 Stabilisation et séchage

Après fabrication des blocs (chapitre 2), les moules sont fermés puis stockés dans une chambre climatisée à (23°C ,50% HR). Ils y sont maintenus fermés pendant une semaine afin de permettre un bon durcissement pour faciliter le démoulage. Puis, les moules sont démontés laissant le bloc sécher sur 5 faces. A partir de ce moment, un suivi massique est réalisé afin d'obtenir la cinétique de séchage.



Figure 3.1 Stockage des échantillons lors de la phase de séchage

Depuis la phase de mise en œuvre de l'échantillon jusqu'à sa stabilisation dans son milieu, l'échantillon sèche : il libère l'excès d'eau utilisé lors de sa fabrication pour être en équilibre avec le milieu ambiant [CER, 05]. Crause [CRA, 83] associe le séchage à l'effet combiné de plusieurs phénomènes d'origine physique : le transfert de masse par la perte d'eau en excès et le changement de phase par évaporation de l'eau.

Une illustration de l'évolution de la masse de l'échantillon au cours du temps est proposée sur la Figure 3.2.

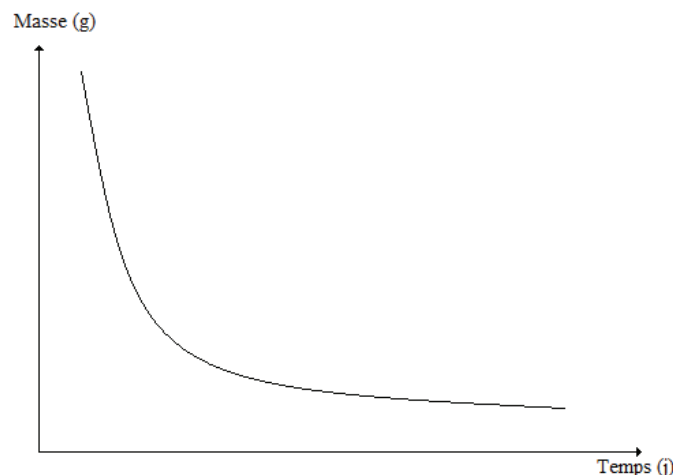


Figure 3.2 Stabilisation des bétons de chanvre avant caractérisation

En connaissant la masse initiale M_0 et la masse au cours du temps M_t on calcule le pourcentage massique perdu au cours du temps :

$$\%_{\text{Perdu}} = \frac{M_0 - M_t}{M_0} * 100 \quad [E 3.1]$$

Le taux d'évaporation est calculé suivant :

$$\tau_{evap} = \frac{M_{t-1} - M_t}{(t_{t-1} - t_t) * S_{Echange}} * 100 \quad [E 3.2]$$

Une fois que le séchage est terminé ($\tau_{evap} < 5\%$) et les blocs stabilisés, une mesure de masse volumique apparente est réalisée afin de déterminer la masse volumique moyenne de la formulation pour ensuite vérifier la représentativité des échantillons.

3.1.2 Découpage et sélection des échantillons

Pour l'ensemble des études de caractérisation des matériaux, les échantillons sont obtenus par carottage ou par découpe des blocs lorsque le carottage ne permet pas de prélever correctement des échantillons. Pour les liants purs, les échantillons ont été directement fabriqués à la bonne dimension, le liant Tradical PF70 est gâché à 0,60, le tradichanvre est gâché à 0,42 afin d'assurer une fluidité convenable pour une mise en œuvre par moulage.



Figure 3.3 Carottage et découpage des échantillons

Les dimensions des échantillons sont choisies de façon à contenir le VER (Tableau 3.1). La dimension minimale retenue est de 5 cm. Pour l'essai de perméabilité à la vapeur, cette dimension correspond au sens du flux d'humidité, le diamètre de la surface d'échange est égal au double de la hauteur.

Dimensions	Forme	essais	Formulations
5x5x5 cm ³	Cubique	Propriétés physiques	Formulations Easy-Chanvre et Laboratoire
		Sorption	
5x7 (d x h)	Cylindrique	Propriétés physiques	Formulation SI2C et liants
		Sorption	
10x5 (d x h)	Cylindrique	Perméabilité à la vapeur d'eau	Toutes les formulations
14x14x7 cm ³	Cubique	Essais mécaniques	Formulations laboratoires

Tableau 3.1 Echantillons et dimensions

3.2 Propriétés physiques

Pour chacune des formulations étudiées, une analyse des propriétés physiques a été réalisée afin de déterminer l'ensemble des paramètres ci-dessous :

- Masse volumique apparente ρ et réelle ρ_s
- Teneur en eau de saturation ω_{sat}
- Porosité ouverte n_0 et totale n

Ces paramètres vont être déterminés à l'aide d'un même échantillon qui subira une suite de manipulations.

Pour chaque formulation, trois échantillons représentatifs ont été sélectionnés.

3.2.1 Masse volumique apparente (23°C / 50% HR)

Pour calculer la masse volumique apparente des échantillons, la masse totale est mesurée par simple pesée et le volume total est calculé à partir des mesures des dimensions. Cette méthode est suffisamment précise dans la mesure où les échantillons ont des géométries simples (cylindres ou parallélépipèdes).

La norme NF EN ISO 12570 [ISO, 12570] recommande une mesure du volume à 1% près et une mesure de la masse à 0,1% près pour la détermination de la masse volumique apparente. Afin de limiter les erreurs, chaque dimension est calculée à partir de la moyenne de quatre mesures. Les caractéristiques des appareils utilisés pour déterminer les masses et dimensions sont décrites ci-dessous :

Appareil	Type	Portée	Precision de lecture	Echantillons
Pied à coulisse mécanique	Dimensions	31 cm	0,01 mm	Blocs, Cylindrique (5x7 et 10x5), cubiques (14x14x7; 5x5x5)
Réglet	Dimensions	30 cm	0,5mm	Blocs
Balance Sartorius 3826 001	Masse	32 000 g	1 g	Blocs
Balance Sartorius 8200S	Masse	8 000 g	0,01 g	Cylindrique (10x5) Cubique (14x14x7)
Balance Sartorius BP 301S	Masse	300 g	0,1 mg	Cylindrique (5x7), cubique (5x5x5)

Tableau 3.2 Appareils et mesures

3.2.2 Teneur en eau de saturation et porosité ouverte

La porosité ouverte est mesurée par pesée hydrostatique. Les échantillons sont initialement séchés au vide avec du gel de silice jusqu'à stabilisation de leur masse. Les échantillons, placés dans un porte-échantillon sont remis sous vide pendant 3 jours. L'eau est introduite jusqu'à immersion totale de l'échantillon et le vide est maintenu pendant 4 jours (Figure 3.4). La pesée hydrostatique est alors réalisée (Figure 3.5).



Figure 3.4 Saturation des échantillons



Figure 3.5 Pesée hydrostatique

3.2.3 Masse volumique réelle et porosité totale

La masse volumique réelle est mesurée par la méthode pycnométrique [Annexe II]. La porosité totale est ensuite calculée à partir de la masse volumique apparente et de la masse volumique réelle (chapitre 1).

La mesure est réalisée sur les mêmes échantillons que ceux utilisés pour la mesure de la teneur en eau de saturation. Après séchage, les échantillons sont broyés et placés dans le pycnomètre (3 échantillons par pycnomètre). Un nouveau séchage, en armoire sèche, est opéré avant saturation à l'acétone.



Figure 3.6 Broyage et mise en place – méthode pycnométrique

3.3 Propriétés hydriques

3.3.1 Sorption

a. Banc expérimental

Les essais de sorption sont menés selon la méthode discontinue : l'isotherme est déterminée point par point par paliers successifs d'humidité relative ambiante croissante (adsorption) puis décroissante (désorption). La stabilisation des échantillons est vérifiée à partir des cinétiques de sorption. La norme [NFEN 12571] préconise une variation de masse entre trois pesées consécutives à au moins 24h d'intervalle inférieure à 0,1% de la masse totale. Afin de réduire la durée des essais, les cinétiques sont modélisées (paragraphe suivant 3.3.1.b).

La mesure est réalisée à 23°C. Le point sec initial est obtenu en plaçant les échantillons dans une chambre sèche contenant du gel de silice (0 à 2% HR) et placée dans un local climatisé à 23°C. Les ambiances suivantes (11%, 23%, 43%, 58%, 81%, 90%, 95% et 97%) sont maîtrisées par une enceinte climatique Vötsch VC4060.

La teneur en eau est calculée à partir des pesées des échantillons (chap.1). Ces pesées sont faites avec une balance Sartorius BP301S ayant une précision de 0,4 mg. Cette précision est conforme à la norme qui recommande une pesée des échantillons à 0,01% de leur masse. Lors des pesées, les échantillons sont protégés des échanges avec l'ambiance par des couvercles stabilisés dans les mêmes conditions.

Les mesures sont faites sur des cylindres de 5 cm de diamètre et 7 cm de hauteur environ ou sur des cubes de 5 cm de côté. Les échantillons sont étanchés en partie supérieure et inférieure afin d'avoir un échange bidimensionnel.

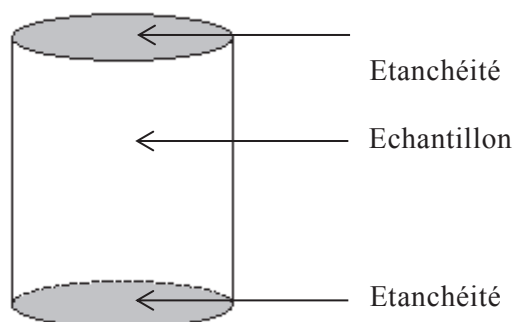


Figure 3.7 Echantillon de sorption

b. Modèle cinétique

La méthode discontinue impose que l'échantillon soit en équilibre avec le milieu ambiant afin de déterminer le point de l'isotherme. Ce protocole nécessite des temps de mesure longs allant de quelques semaines à plusieurs mois pour chaque palier. Outre le problème de durée d'essai, ces expositions prolongées, dans des conditions hygrométriques extrêmes, peuvent conduire à une dégradation des échantillons (moisissures, champignons). Afin de palier à cet inconvénient, Collet et Pretot [COL, 09] ont réalisé une étude permettant d'exploiter un modèle cinétique afin de réduire la

durée de l'essai. L'évolution de la masse totale de l'échantillon en fonction du temps décrit une courbe exponentielle. Cette évolution correspond à celle de la masse d'eau absorbée et donc à celle de la teneur en eau de l'échantillon [TAD, 05]. La teneur en eau lors de la mesure d'un palier quelconque s'écrit à l'instant t :

$$\omega(t) = \omega_i + \Delta\omega(t) \text{ avec } \Delta\omega(t) = a[1 - b \cdot \exp(-ct)] \quad [E 3.3]$$

$\omega(t)$: Teneur en eau à l'instant t lors de la mesure d'un palier quelconque,

ω_i teneur en eau initiale du palier,

$\Delta\omega(t)$: Variation de teneur en eau entre l'instant initial et l'instant t pour le palier considéré,

a, b, c : Paramètres d'ajustement.

L'ajustement de l'équation [E 3.3] aux données expérimentales conduit à la teneur en eau à l'équilibre. Pour un instant t infini, $\Delta\omega(t)$ est égal à a . L'ajustement est réalisé par la méthode des moindres carrés.

Afin d'assurer une prédiction correcte de la teneur en eau d'équilibre, deux critères d'arrêt doivent être respectés :

Le taux de variation [E 3.4] de la teneur en eau, doit être supérieur à 2/3, Collet et Pretot [COL, 09] montrent que le taux de variation atteint rapidement des valeurs importantes et est supérieur à 2/3 en moins de 10 jours.

$$\tau = \frac{\omega_{exp,t} - \omega_i}{\omega_{\infty,t} - \omega_i} \quad [E 3.4]$$

$\omega_{exp,t}$: Teneur en eau expérimentale à l'instant t ,

ω_i teneur en eau initiale du palier,

$\omega_{\infty,t}$: Teneur en eau à l'équilibre calculée à l'instant t ,

L'écart entre les teneurs en eau d'équilibre calculées à trois instants consécutifs, à au moins 48 heures d'intervalle, doit être inférieur à 0,1%

En utilisant ces deux critères, les temps d'essais sont réduits tout en évaluant de manière précise les teneurs en eau d'équilibre pour chaque palier.

c. Modélisation des isothermes

Il existe différents modèles permettant de décrire les isothermes de sorption. On retrouve des modèles mathématiques et empiriques (Tableau 3.3).

Les modèles Langmuir, BET et GAB sont les principaux modèles utilisés.

- **Modèle Langmuir** : La théorie de Langmuir [LAN, 18] modélise l'adsorption de la première couche de molécules d'eau. Dans ce type d'adsorption, toutes les molécules d'eau sont liées au solide par une énergie de liaison molaire. Cette théorie décrit l'adsorption monocouche et n'a une application vérifiée qu'aux faibles humidités relatives ($HR < 10-20\%$).

$$\omega = \omega_m \frac{C \cdot HR}{1 + C \cdot HR} \quad [E 3.5]$$

- **Modèle BET** : Brunauer, Emmet et Teller [BRU, 38][BRU, 69] ont développé un modèle qui décrit l'adsorption polymoléculaire. Ce modèle considère que les molécules de la première couche sont liées au solide par une énergie égale à la

chaleur molaire d'adsorption E_1 et que les molécules des autres couches sont liées entre elles par une énergie égale à la chaleur molaire latente de vaporisation E_L . Les effets d'interactions mutuelles entre molécules adsorbées sont négligés.

Dans cette théorie, l'eau se fixe au matériau sous forme de couches adsorbées successives. La première couche n'est pas obligatoirement complète avant le début de la suivante. Le nombre de couches pouvant être adsorbées n'étant pas limité par la dimension des pores, la teneur en eau obtenue pour une humidité relative ambiante de 100% est infinie. Ainsi son application pour les milieux poreux n'est considérée valide que pour des humidités relatives inférieures à 40%.

$$\frac{w}{w_m} = \frac{C_2 HR}{(1 - HR)(1 - HR + C_2 HR)} \quad [E 3.6]$$

Le tracé des données sous la forme BET linéarisée conduit à la teneur en eau monomoléculaire et à la constante C.

- **Modèle GAB** : Guggenheim, Anderson et De Boer ont indépendamment établi le modèle GAB (cité par Merouani [MER, 87]). Ce modèle tient compte d'une chaleur d'adsorption $E_m \neq E_L$ pour toutes les couches moléculaires. Ce modèle n'est physiquement valable qu'en absence de condensation capillaire : typiquement $HR < 40\%$. C'est un bon outil de lissage mathématique des isothermes de sorption sur la quasi-totalité du domaine d'humidité relative. [MER, 87]

$$\omega = \omega_m \frac{HR.C.K}{(1 - HR.K)(1 + HR.C.K - HR.K)} \quad [E 3.7]$$

Le tracé des données sous la forme GAB linéarisée permet d'identifier le domaine de sorption mono-polymoléculaire et le domaine de condensation capillaire. D'un point de vue physique, l'ajustement du modèle doit se faire en excluant la zone de condensation capillaire. D'un point de vue mathématique, l'ajustement du modèle peut également se faire sur l'ensemble du domaine d'humidité relative.

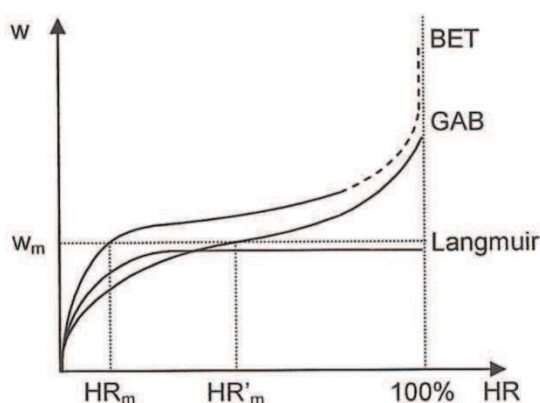


Figure 3.8 Allure des courbes des principaux modèles d'adsorption

Modèle Harkins-Jura : Ce modèle [HAR, 44] est utilisé dans les cas des isothermes d'adsorption à hautes pressions relatives en poly-moléculaire. Les auteurs sont partis du principe que les couches de molécules d'eau sont similaires à des films d'acides gras recouvrant la surface de l'eau. Dans ce cas, une pression bidimensionnelle P est décrite par une relation linéaire de la surface S_0 recouverte par une molécule.

$$P = b - a.S_0 \quad [E 3.8]$$

a, b : Constantes liées à la compressibilité du film

Les molécules sont considérées comme ayant un volume constant et se déforment sous l'effet de la pression. Les auteurs ont transformé cette équation en une relation s'appliquant aux couches absorbées :

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = B - \frac{10^{20}.a.S_w^2.M^2}{2RTN_0V^2} = B - \frac{A.S_w^2}{V^2} \quad [E 3.9]$$

a, A et B : Constantes,

S_w : Surface du solide,

V : Volume absorbé,

M : Volume molaire du gaz

Cette relation est utilisable pour un domaine de pression relative compris entre 0,5 et 0,8. Ce modèle est fiable pour des films polymères mais n'est pas compatible avec un matériau très poreux comme le béton de chanvre.

- **Modèle Henderson** : Afin de tenir compte de l'influence de la température T sur l'équilibre hygroscopique, le modèle Henderson peut être utilisé [HEN, 52].

$$\omega = \left[\frac{-\ln(1-HR)}{k(1,8T+492)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad [E 3.10]$$

Ce modèle décrit l'ensemble de l'isotherme de sorption. Les constantes sont dépendantes de la température et des caractéristiques du matériau.

En linéarisant cette équation, l'équation suivante est obtenue :

$$n.\ln(\omega) + \ln(k) = \ln(-\ln(1-HR)) - \ln(1,8T + 492) \quad [E 3.11]$$

La droite obtenue a pour coefficient directeur la constante n . $\ln(k)$ est la valeur de l'intersection avec l'ordonnée [BEL, 99]. Cette équation permet le découpage en deux de l'isotherme ce qui permet de décrire l'isotherme dans le domaine monomoléculaire et polymoléculaire.

- **Modèle Smith** : Ce modèle empirique [SMI, 47] est un modèle à deux variables développé dans le cas des polymères ou produits biologiques. Il permet de décrire la dernière partie incurvée de l'isotherme d'adsorption. Cette équation a été validée pour des polymères à haute teneur en molécule pour des humidités relative comprises entre 50% et 95%.

$$HR = 1 - \exp\left[\frac{k - \omega}{n}\right] \quad [E 3.12]$$

k et n sont des paramètres sans dimensions. k représente l'humidité liée à la surface et n représente l'humidité dans une couche monomoléculaire condensée normalement. [HOU, 07].

- **Modèle Oswin** : Ce modèle [OSW, 46] est basé sur l'expansion de la série de Pearson pour des isothermes de type II de forme sigmoïde. Il prend en compte la température et permet de décrire l'isotherme de façon complète.

$$HR = \left[1 + \left(\frac{A + B.T}{\omega} \right)^C \right]^{-1}$$

[E 3.13]

Auteurs	Modèle	Paramètres	Application
Langmuir	$\omega = \omega_m \frac{C.HR}{1 + C.HR}$	$C = \exp\left(\frac{E_l}{RT}\right)$ ω_m	Zone 1
Brunauer Emmet Teller (BET)	$\frac{w}{w_m} = \frac{C HR}{(1 - HR)(1 - HR + C HR)}$ BET linéaire : $\frac{HR}{(1 - HR)\omega} = \frac{1}{C.\omega_m} + \frac{C - 1}{C.\omega_m} HR$	$C = \exp\left(\frac{E_l - E_L}{RT}\right)$ ω_m n (nombre de couches)	Zone 2 Zone 1
Guggenheim Anderson De Boer (GAB)	$\omega = \omega_m \frac{HR.C.K}{(1 - HR.K)(1 + HR.C.K - HR.K)}$ GAB linéaire : $\frac{HR}{(1 - K.HR)\omega} = \frac{1}{K.C.\omega_m} + \frac{C - 1}{C.\omega_m} HR$	$C = \exp\left(\frac{E_l - E_m}{RT}\right)$ $K = \exp\left(\frac{E_L - E_m}{RT}\right)$ ω_m	Courbe complète Courbe complète
Harking-Jura	$HR = \exp\left[k - \frac{n}{\omega^2}\right]$	k n	Courbe complète
Smith	$HR = 1 - \exp\left[\frac{k - \omega}{n}\right]$	k n	Courbe complète
Henderson	$HR = 1 - \exp(-A.(T + B)\omega^C)$	A B C	Courbe complète
Oswin	$HR = \left[1 + \left(\frac{A + B.T}{\omega} \right)^C \right]^{-1}$	A B C	Courbe complète

Tableau 3.3 Différents modèles utilisés pour la modélisation des isothermes

E_l : Chaleur molaire d'adsorption [$J.mol^{-1}$] ;

E_L : Chaleur molaire latente de vaporisation [$J.mol^{-1}$]

ω_m : Teneur en eau à la transition entre les zones 1 et 2 (saturation de la monocouche) ;

n : Nombre de couches

d. Surface spécifique des matériaux

La surface spécifique massique S_m peut être calculée à partir de l'évaluation de la teneur en eau monomoléculaire ω_m faite avec le modèle BET linéaire et GAB linéaire (Tableau 3.3) :

$$S_m = \sigma_m \cdot N \cdot \frac{\omega_m}{M} \quad [E 3.14]$$

S_m : Surface spécifique massique [$m^2 \cdot g^{-1}$]

σ_m : Surface d'une molécule adsorbée ($\approx 10 \text{ \AA}^2$)

N : Nombre d'Avogadro (6,023.1023)

M : Masse molaire (eau $18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$)

3.3.2 Perméabilité à la vapeur

a. Protocole d'essai

La perméabilité à la vapeur est mesurée selon la méthode de la coupelle [ISO, 12572] [PAV, 11] [PER,98] et à l'aide du banc expérimental mis en place au sein du laboratoire [COL, 04]. L'échantillon est étanché afin d'assurer un transfert monodimensionnel. Cet échantillon est placé sur une coupelle dans laquelle se trouve une solution saline ou un dessicant permettant de maintenir une humidité relative HR_i . Le complexe (échantillon + coupelle) est disposé dans une ambiance de température et d'humidité relative HR_e contrôlées.

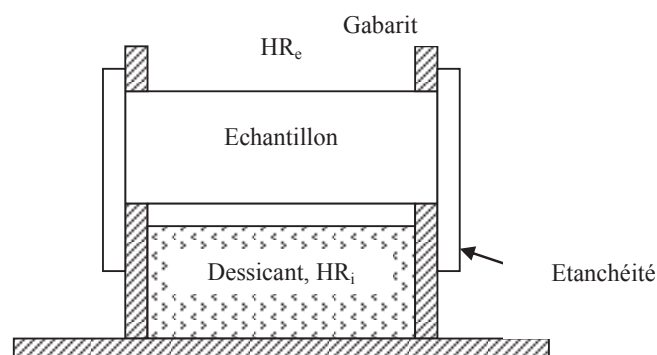


Figure 3.9 Principe de l'essai de perméabilité à la vapeur – Méthode de la coupelle

L'essai est réalisé d'une part pour le couple normatif (0 ; 50%) et d'autre part pour différents couples (HR_i ; HR_e) afin d'appliquer la méthode des tangentes de part et d'autre des points mesurés en sorption [COL, 09]. Cette étude donne l'évolution de la perméabilité à la vapeur d'eau π en fonction de l'humidité. Les points présentés sont (0 ; 23 %), (23 ; 43), (23 ; 33 %), (43 ; 58 %), (58 ; 81 %), (81 ; 90) et (81 ; 94).

Durant toute la durée de l'essai, un suivi massique de l'ensemble (échantillon + coupelle) en fonction du temps est réalisé. La pesée a une précision de 0,03 grammes.

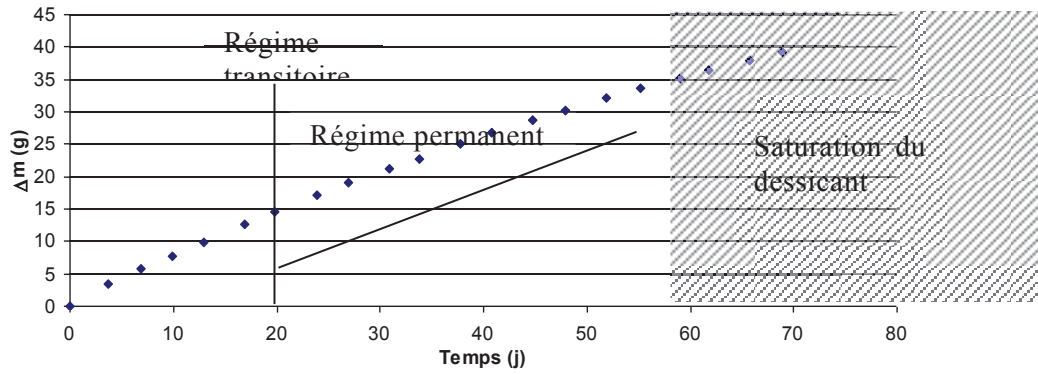


Figure 3.10 Exemple d'évolution de la masse en fonction du temps

En régime permanent, on calcule alors dans un premier temps le taux de variation de la masse G à l'aide de l'équation suivante :

$$G = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad [E 3.15]$$

La densité de flux de vapeur g_h est obtenue par :

$$g_h = \frac{G}{A} \quad [E 3.16]$$

La surface exposée de l'éprouvette A est égale à la moyenne arithmétique des surfaces supérieure et inférieure libres (précision de mesure des diamètres : 10^{-2} mm). Ces surfaces sont contrôlées par la dimension de la coupelle en face inférieure et par un gabarit en face supérieure de l'échantillon.

La pression de vapeur p_{ve} est calculée à partir des enregistrements de température T et d'humidité relative HR_e au cours de l'essai. Les mesures sont faites avec un enregistreur autonome étalonné de type KIMO HD 200 avec une précision de ± 0.1 °C sur la température et de $\pm 1.5\%$ sur l'humidité relative HR . Le pas d'acquisition est de cinq minutes.

La perméance à la vapeur d'eau W est ensuite obtenue avec :

$$W = \frac{G}{A \Delta p_v} \quad [E 3.17]$$

Ainsi, à tout instant t , la pression de vapeur saturante est calculée suivant l'équation :

$$p_{vs} = 100 * e^{\frac{18,986 - 4052}{235,89 - T_t}} \quad [E 3.18]$$

Sachant que l'humidité relative HR est égale à :

$$HR = 100 * \frac{p_v}{p_{vs}} \quad [E 3.19]$$

Ainsi, la pression de vapeur est connue à tout instant t , et sa valeur moyenne est calculée sur la durée du régime permanent.

Connaissant l'épaisseur des échantillons e et à l'aide de [E 3.17], la perméabilité à la vapeur d'eau π est alors égale à :

$$\pi = We \quad [E 3.20]$$

Enfin, le facteur de résistance à la vapeur d'eau μ_v est défini suivant:

$$\mu_v = \frac{\pi_a}{\pi} \quad [E 3.21]$$

π_a la perméabilité à la vapeur de l'air (à 23°C et à Pression atmosphérique : $1,95.10^{-10}.kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$).

b. Modélisation de l'évolution de la perméabilité à la vapeur avec l'humidité

La perméabilité à la vapeur augmente avec l'humidité relative. Cette augmentation est généralement attribuée à l'apparition du transfert liquide. La littérature propose des modèles «exponentiel» et «puissance» en fonction de l'humidité relative [GAL, 97]. Derome et al. [DER, 08] proposent pour des matériaux hystérétiques, une description de l'évolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de la teneur en eau.

Sur l'ensemble des points expérimentaux, un ajustement est réalisé avec une loi puissance :

$$\pi = A + B.HR^C \quad [E 3.22]$$

3.3.3 Diffusivité hydrique

a. Couplage des isothermes de sorption et de la perméabilité à la vapeur

Dans des conditions isothermes, pour un transfert monodimensionnel, l'équation de conservation de la masse s'écrit :

$$g_h = -\rho_0 D_u \frac{\partial w}{\partial x} \quad [E 3.23]$$

La relation entre la teneur en eau du matériau et l'humidité relative ambiante $w = f(HR)$ définie par les isothermes de sorption est continue et dérivable sur l'ensemble du domaine hygroscopique. Ainsi, on peut écrire :

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial x} \quad [E 3.24]$$

La combinaison de ces deux équations donne :

$$g_h = -\rho_0 D_u \frac{\partial w}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial x} \quad [E 3.25]$$

Le gradient de pression de vapeur étant linéaire dans le matériau et les conditions isothermes, le gradient d'humidité relative est donc également linéaire. On obtient alors :

$$g_h = -\rho_0 D_u \frac{\partial w}{\partial HR} \frac{HR_2 - HR_1}{e} \quad [E 3.26]$$

De plus, le flux d'humidité s'écrit en monodimensionnel :

$$g_h = -\pi \Delta P_v = -\pi \frac{P_{v2} - P_{v1}}{e} \quad [E 3.27]$$

La combinaison des équations [E 3.26] et [E 3.27] donne:

$$\rho_0 D_u \frac{\partial w}{\partial HR} \frac{HR_2 - HR_1}{e} = \pi \frac{P_{v2} - P_{v1}}{e} \quad [E 3.28]$$

avec : $HR = \frac{P_v}{P_{vs}}$

On obtient alors :

$$D_u = \frac{\pi P_{vs}}{\rho_0} \frac{1}{\frac{\partial w}{\partial HR}} \quad [E 3.29]$$

D_u : coefficient de diffusion hydrique dans le milieu poreux [$m^2.s^{-1}$],

π : perméabilité à la vapeur [$kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$],

P_{vs} : pression de vapeur saturante [Pa],

ρ_0 : masse volumique apparente sèche du matériau [$kg.m^{-3}$],

$\frac{\partial w}{\partial HR}$: dérivée de l'isotherme de sorption.

3.4 Propriétés mécaniques

Les essais mécaniques sont réalisés sur une presse INSTRON modèle 5588S de capacité 400 kN. Les données d'essais sont enregistrées et traitées sur informatique.

L'ensemble des essais est conduit par contrôle en déplacement avec des cycles de chargements et déchargements comme le montre la Figure 3.11. La vitesse de chargement est de 5 mm.s^{-1} et la vitesse de déchargement est de 10 mm.s^{-1} . Les valeurs de déplacement maximum de chaque cycle sont choisies de façon à balayer aussi bien le domaine de déformations quasi réversibles que le domaine de déformation non réversibles. La rigidité de la presse est importante, ce qui permet de se dispenser de l'étalonnage de la déformation du bâti.

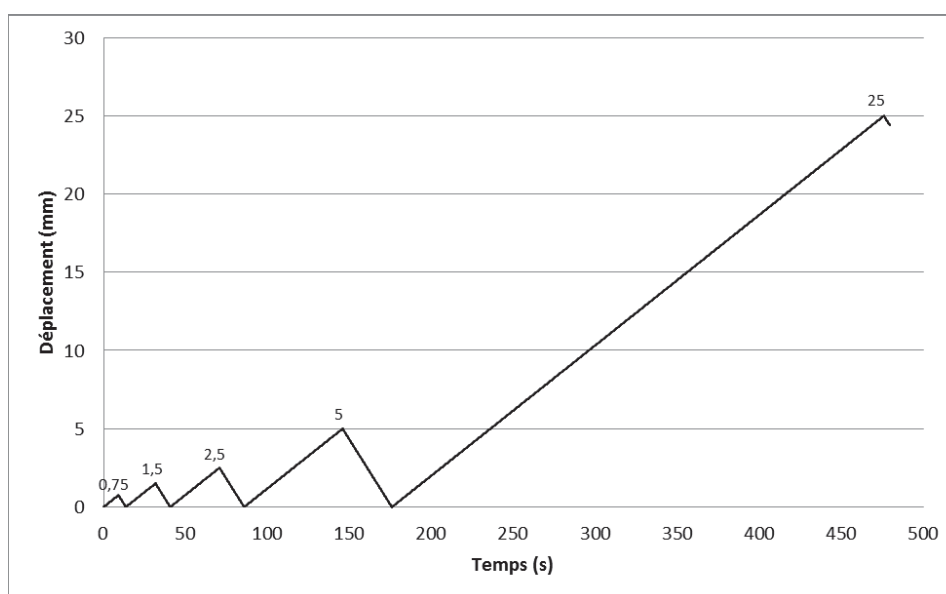


Figure 3.11 Protocole de chargement

L'étude porte sur les formulations développées en laboratoire. Pour chaque formulation, 2 blocs sont utilisés. Dans chaque bloc, 4 échantillons de dimensions $14 \times 14 \times 7 \text{ cm}^3$ sont coupés. Deux échantillons sont stabilisés en salle sèche (23°C , 50% HR). Les deux autres sont installés dans une enceinte CO_2 pour les carbonater. Cette enceinte est réglée à 20% de CO_2 et 95% d'humidité relative. Une fois carbonatés, les échantillons sont stabilisés en salle sèche également.

Les essais sur des échantillons carbonatés et non carbonatés sont réalisés dans les mêmes conditions (thermiques et hydriques) initiales. Les plateaux de la presse présentent une surface identique à la surface initiale de l'échantillon.

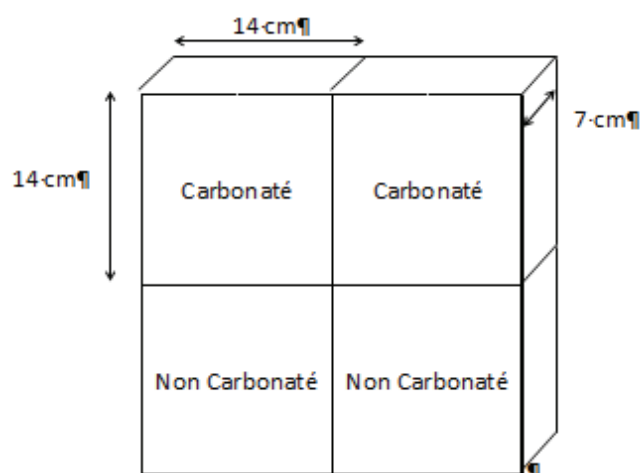


Figure 3.12 Découpage des blocs de béton de chanvre et dimensions

Pour l'ensemble des échantillons, la courbe des contraintes σ en fonction des déformations ε est tracée (figure 3.14). La contrainte correspond au rapport de l'effort appliqué à la surface de contact. La déformation est estimée en rapportant la variation de hauteur de l'éprouvette à la hauteur initiale. Sur les courbes ainsi obtenues, différentes caractéristiques sont identifiées :

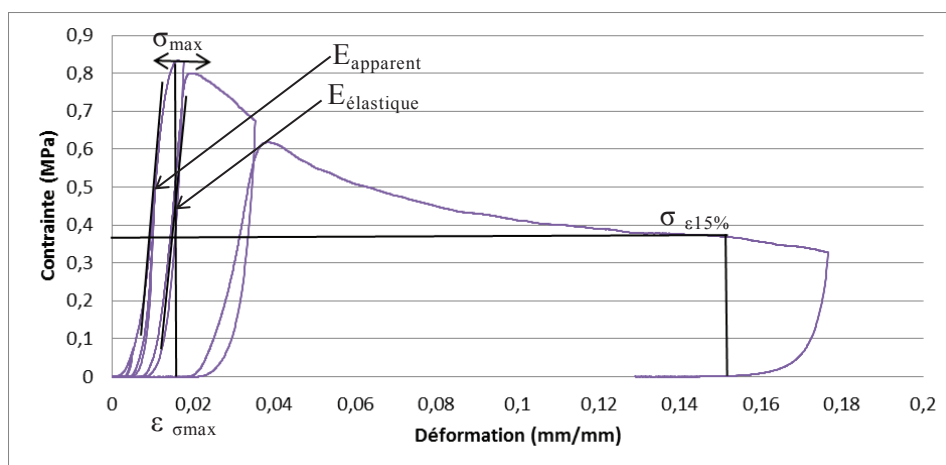


Figure 3.13 Courbe d'essai et données relevées

Sur cette courbe, les valeurs relevées sont les suivantes :

- σ_{\max} : la contrainte maximale σ_{\max} (kPa),
- $\varepsilon_{\sigma_{\max}}$: la déformation pour la contrainte maximale (m/m),
- E_{apparent} : Module apparent correspondant au module de la courbe principale de chargement (kPa),
- $E_{\text{élastique}}$: Module d'élasticité correspondant au module réversible des cycles de décharge et recharges (kPa),
- $\sigma_{\varepsilon 15\%}$: Contrainte résiduelle pour une déformation de 15% (MPa); qui constitue un indice de la ductilité du matériau après rupture.

La courbe présentée en présente en zoom l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation dans le cas du chargement dans le cas du deuxième chargement afin de déterminer le module de Young élastique $E_{\text{élastique}}$.

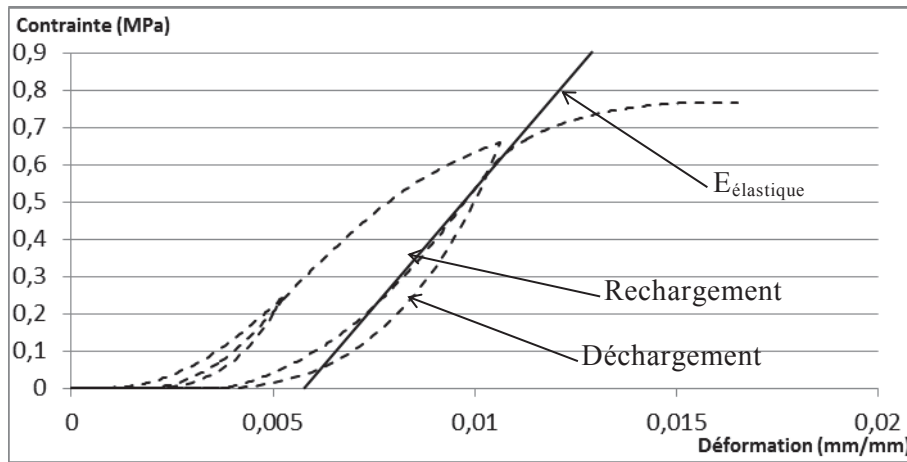


Figure 3.14 Zoom – Cas du deuxième chargement – Détermination du module de Young Elastique

3.5 Carbonatation et vieillissement

Le béton de chanvre est un matériau très poreux où les échanges avec l'ambiance extérieure est assez facile. La carbonatation s'en trouve favorisée car le CO_2 est facilement transportable à cœur.

Une enceinte CO_2 (Thermo Electron Corporation, Forma Series II Hepa class 100) a été utilisée pour carbonater certains échantillons afin d'étudier l'effet de la carbonatation sur les propriétés hydriques et mécaniques des bétons de chanvre. Cette machine est réglée à une humidité relative de 95% et un taux de CO_2 variant de 0 à 20%. Les échantillons destinés aux tests de vieillissement sont placés dans l'enceinte jusqu'à ce que la carbonatation soit constatée au cœur des échantillons par marquage à la phénolphtaléine. [VIL,07]



Figure 3.15 Enceinte CO_2

Chapitre 4

Résultats et interprétations

4.1 Formulations et analyses

Différentes formulations de béton de chanvre sont étudiées. Les formulations de type « mur » sont celles utilisées comme référence. Ensuite des variations sur le taux de liant, le taux de compactage, le type de liant et le type de chènevotte sont réalisées afin de comprendre les effets de ces variations sur les propriétés du béton de chanvre. Deux formulations d'enduits chanvre-chaux et les liants Tradical PF70 et Tradichanvre sont également considérés. Le tableau ci-dessous récapitule les formulations étudiées ainsi que la formulation de référence associée.

Type		Formulations	Formulation de comparaison
Référence		SI2C Référence	-
		Easy-chanvre Référence	-
V a r i a n t e s	Taux de compactage	Easy-chanvre Variante 1	Easy-Chanvre Référence
		Easy-chanvre Variante 2	
	Taux de liant	SI2C Dalle	SI2C Référence
		SI2C Toiture	
	Type de liant	Laboratoire Formulation 1	SI2C Référence
		Laboratoire Formulation 3	
		Laboratoire Formulation 4	
	Type de Chanvre	SI2C Référence Terrachanvre	SI2C Référence
		Laboratoire Formulation Fibre traitée	
		Laboratoire Formulation 2	Laboratoire Formulation 1
		Laboratoire Formulation 2 Carbonatée	Laboratoire Formulation 2
Enduit et liant		Liant Tradical PF70	-
		Liant Tradichanvre	-
		Enduit Chanvribat	Liant Tradichanvre
		Enduit Terrachanvre	

Tableau 4.1 Décompositions des comparaisons des formulations

Le détail des données expérimentales de sorption, de perméabilité à la vapeur d'eau et des essais mécaniques est donné en annexe pour l'ensemble des matériaux étudiés.

4.2 Formulations de bétons de chanvre de type « Mur » - « Référence »

Ce paragraphe donne les résultats obtenus pour les formulations de type « Mur » utilisées par la suite comme référence : SI2C Référence et Easy-Chanvre Référence. La méthodologie d'analyse et le choix des modèles utilisés par la suite y sont présentés.

4.2.1 Séchage et masse volumique apparente

a. Cinétique de séchage

La Figure 4.1 présente les cinétiques de séchage expérimentales pour les deux formulations SI2C Référence et Easy-chanvre Référence. Sur ces courbes sont présentées en croix grise les valeurs expérimentales pour quelques blocs, en trait plein la moyenne et en trait pointillé les bornes (moyenne \pm écart-type). La période de confinement est également repérée.

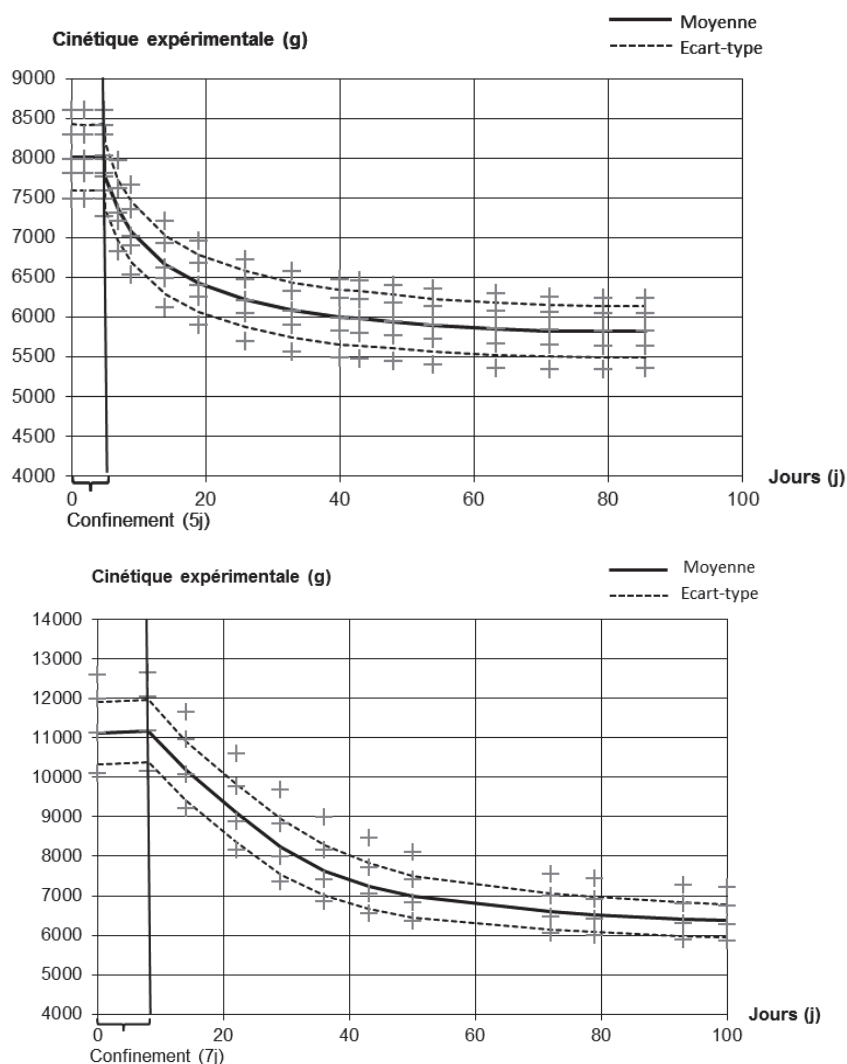


Figure 4.1 Evolution de la masse expérimentale en fonction du temps [$g.j^{-1}$]
Haut : SI2C Référence / Bas : Easy-Chanvre Référence

Les deux formulations ont un comportement au séchage similaire où les différents états sont rapidement identifiables. L'état initial est maintenu durant toute la période de confinement jusqu'au démoulage à 5-7 jours. Durant cette période, la masse est constante. Après démoulage, le séchage s'établit et la masse des blocs diminue correspondant à l'apparition de la zone diffusionnelle (Etat2). Cet état est observé pendant environ quinze jours pour SI2C Référence et environ quarante jours pour Easy-Chanvre Référence. Au-delà, la vitesse de séchage diminue en lien avec l'apparition de la zone sèche (Etat 3). Le suivi massique est réalisé jusqu'à la stabilisation massique des blocs (Respectivement 85 et 100 jours)

b. Pourcentage de perte massique

La Figure 4.2 présente le pourcentage de perte massique en fonction du temps.

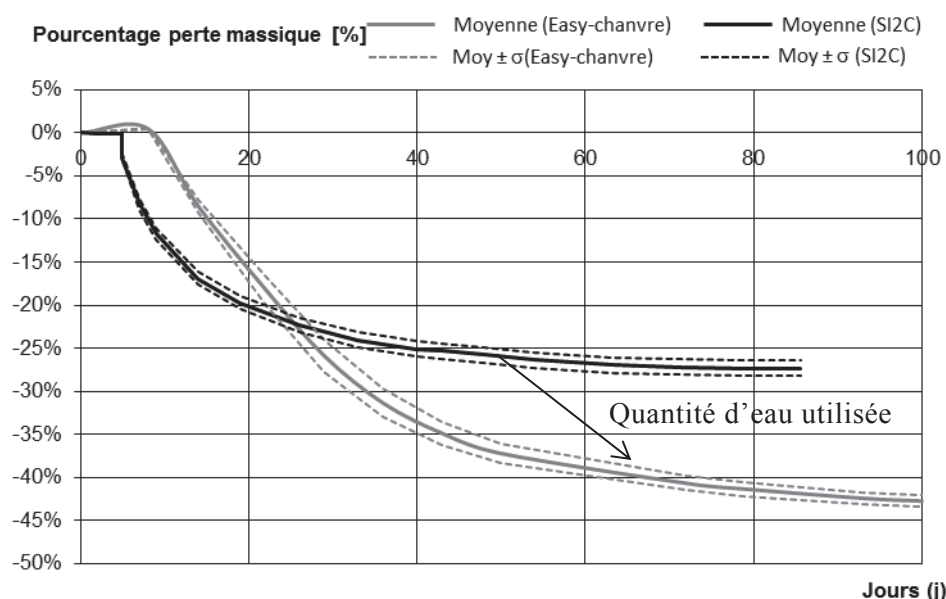


Figure 4.2 Evolution du pourcentage de perte massique

On observe un écart important entre les deux formulations. Une fois le séchage terminé, SI2C Référence a perdu environ 30% de sa masse initiale alors que Easy-chanvre Référence a perdu environ 45% de sa masse. La différence de quantité d'eau utilisée lors de la mise en œuvre pour une formulation équivalente en chanvre et liant tend à étirer la courbe dans le temps et le pourcentage de masse perdue comme le montre la flèche sur la courbe.

c. Taux d'évaporation

La Figure 4.3 présente le taux d'évaporation τ_{evap} en fonction du temps. On retrouve les quatre états décrits précédemment.

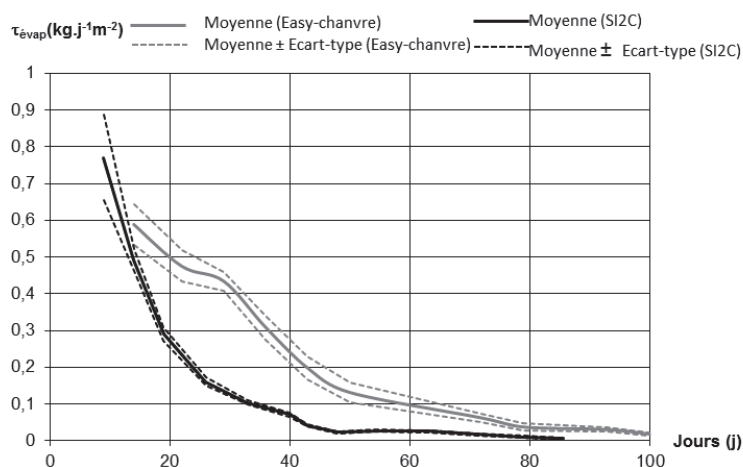


Figure 4.3 Evolution du taux d'évaporation au cours du temps

Au cours de l'état 2, le taux d'évaporation varie rapidement de 0,8 à 0,3 $\text{kg.j}^{-1}.\text{m}^{-2}$ pour SI2C et de 0,6 à 0,4 $\text{kg.j}^{-1}.\text{m}^{-2}$ pour Easy-Chanvre. Cette courbe permet d'identifier la fin du séchage correspondant à un taux d'évaporation de 0,05, c'est à dire après 40 jours pour SI2C et 80 jours pour Easy-Chanvre. La quantité d'eau initialement utilisée lors de la mise en œuvre explique cette différence.

d. Evolution de la masse volumique apparente

Pour finir, la Figure 4.4 présente l'évolution de la masse volumique apparente théorique en fonction du temps. Le volume apparent a été pris comme étant un volume de $30*30*16 \text{ cm}^3$ qui correspond au volume de l'alvéole utilisée pour la mise en œuvre.

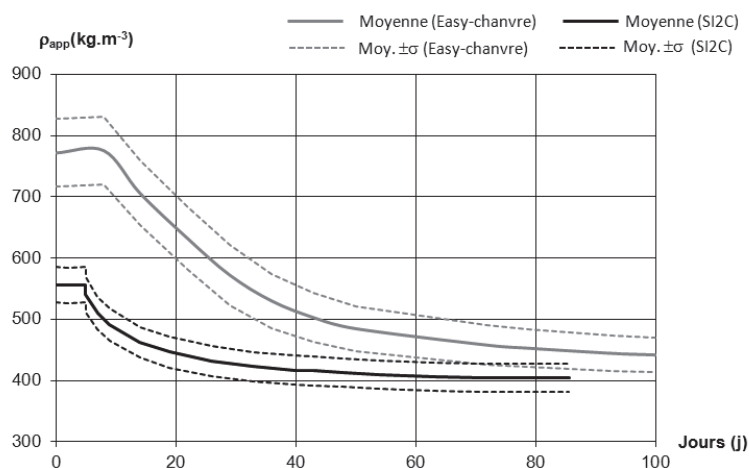


Figure 4.4 Evolution de la masse volumique en fonction du temps – Formulations références

A stabilisation, les deux formulations de référence convergent vers une masse volumique apparente commune qui est de l'ordre de 400-440 kg.m^{-3} en moyenne sur l'ensemble des blocs.

4.2.2 Propriétés physiques

a. Masse volumique apparente

Une fois que le séchage et la stabilisation à la température de 23°C et 50% d'humidité relative sont terminés, les blocs sont mesurés et pesés et la masse volumique apparente expérimentale est calculée. (Figure 4.5 et Tableau 4.2).

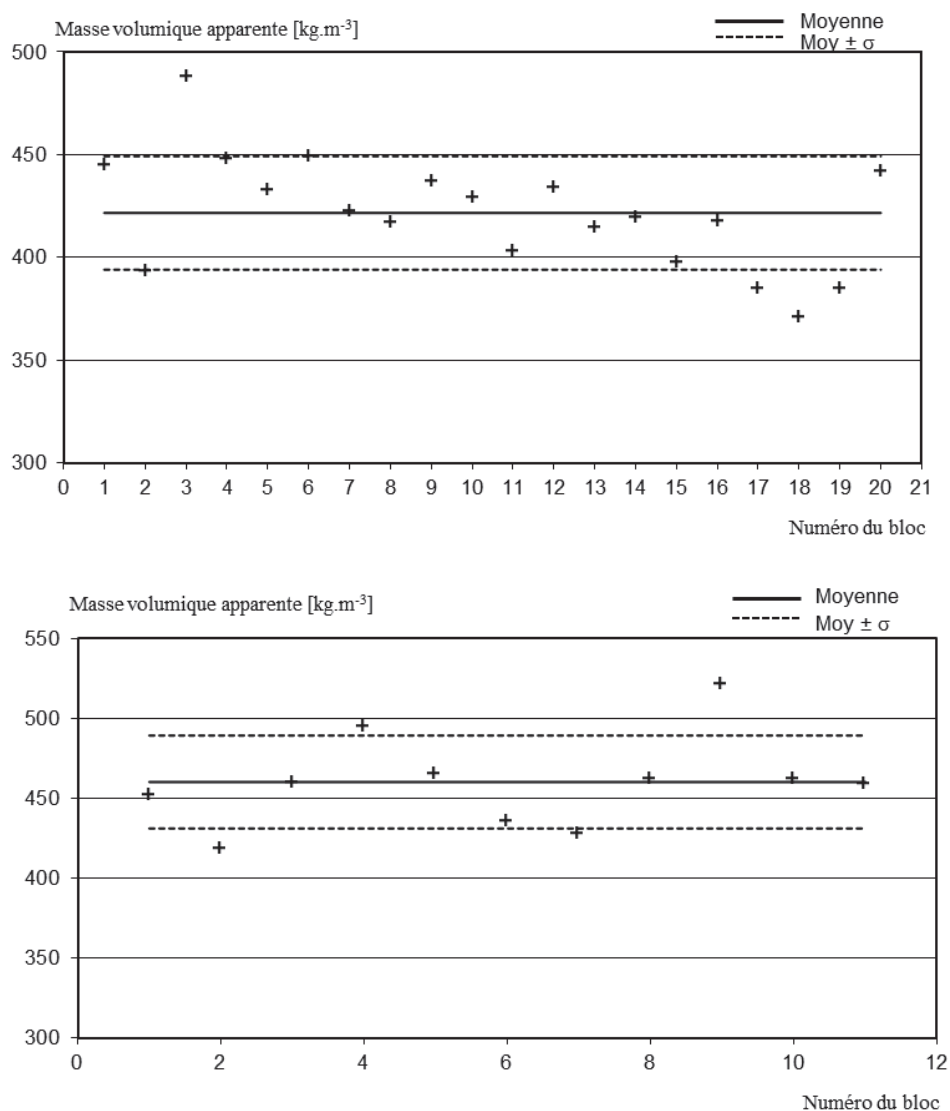


Figure 4.5 Masse volumique apparente des blocs – Référence
Haut : SI2C Référence / Bas : Easy-Chanvre Référence

La masse volumique apparente moyenne pour les formulations de type référence est de l'ordre de 440 kg.m^{-3} quelle que soit la méthode de mise en œuvre utilisée (Malaxage et compactage ou projection) (420 kg.m^{-3} pour SI2C et 460 kg.m^{-3} pour Easy-chanvre.). Cette masse volumique est supérieure à celle habituellement obtenue par la société Easy Chanvre. Les moules utilisés pour cette étude n'étant pas les mêmes que leurs moules habituels, cela a pu modifier la mise en œuvre, notamment au niveau de la vibration.

Les masses volumiques des blocs sont homogènes : les écart-types n'excèdent pas 30 kg.m^{-3} .

Formulation	$\rho_{\text{app moy}} [\text{kg.m}^{-3}]$	Ecart-type	nb blocs
SI2C Référence	421,6	27,6	20
Easy- Chanvre Référence	460,1	29,1	11

Tableau 4.2 Masse volumique apparente des blocs - Référence

Les blocs sont ensuite carottés et découpés afin d'obtenir les échantillons souhaités pour réaliser les essais de caractérisation. Les échantillons sont sélectionnés sur critère de masse volumique apparente (comprise dans la plage moyenne \pm écart-type) et d'homogénéité de surface afin d'être représentatifs du matériau.

b. Autres caractéristiques physiques

Le Tableau 4.3 présente la masse volumique réelle, la porosité ouverte et la porosité totale des formulations de référence.

La masse volumique réelle mesurée pour la formulation SI2C Référence présente un écart de 3% avec la valeur théorique donnée au chapitre 2, ce qui est compatible avec les précisions de mesure. Pour la formulation Easy-Chanvre Référence, l'écart est plus important (12%) en lien avec une moins bonne maîtrise de la composition.

La formulation SI2C Référence présente des porosités ouvertes (60,2%) et totales (78,9%) supérieures à celle de la formulation Easy-Chanvre Référence (respectivement 54,0 % et 72,2 %).

	n_0	$\rho_{\text{reel}} [\text{kg.m}^{-3}]$	n
Easy-Chanvre Référence	54.0%	1655.84	72.2%
SI2C Référence	60.2%	1996.53	78.9%

Tableau 4.3 Autres caractéristiques physiques - Référence

4.2.3 Propriétés hydriques

a. Stockage : Isothermes de sorption

Les essais ont été réalisés dans des conditions isothermes à 23°C pour des humidités relatives HR de :

- En adsorption : $0 \rightarrow 11 \rightarrow 23 \rightarrow 33 \rightarrow 43 \rightarrow 58 \rightarrow 81 \rightarrow 90 \rightarrow 95 \rightarrow 97 \%$,
- En désorption : $97 \rightarrow 90 \rightarrow 81 \rightarrow 58 \rightarrow 43 \rightarrow 23 \rightarrow 0$.

+ Cinétiques d'adsorption et de désorption

Pour chaque humidité relative, un suivi massique au cours du temps est réalisé et la cinétique d'adsorption ou de désorption est tracée (Figure 4.6 et Figure 4.7).

Au fur et à mesure de l'essai, le modèle cinétique est appliqué. L'ensemble des résultats est donné en annexe. La Figure 4.6 et la Figure 4.7 présentent respectivement les résultats obtenus pour la formulation SI2C Référence entre les hygrométries 43 et 58% en adsorption et en désorption. Ces cinétiques sont représentatives de l'ensemble des cinétiques obtenues.

On observe une très forte corrélation entre les cinétiques expérimentales et modélisées.

L'application du modèle de cinétique permet de réduire le temps d'essai à 20 à 40 jours par palier. La durée totale pour la mesure des isothermes de sorption est d'un an et neuf mois.

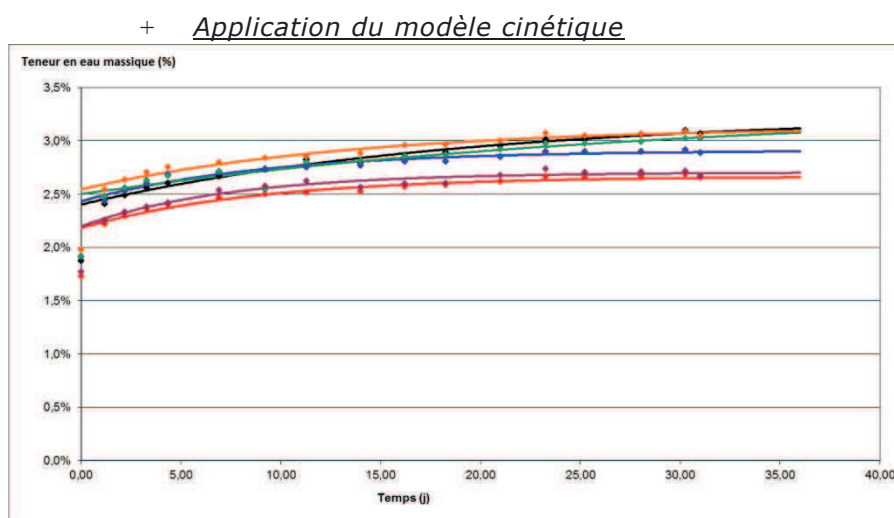


Figure 4.6 Cinétique d'adsorption – SI2C Référence – 43 → 58% HR
Points : Valeurs expérimentales / Ligne : Modélisation

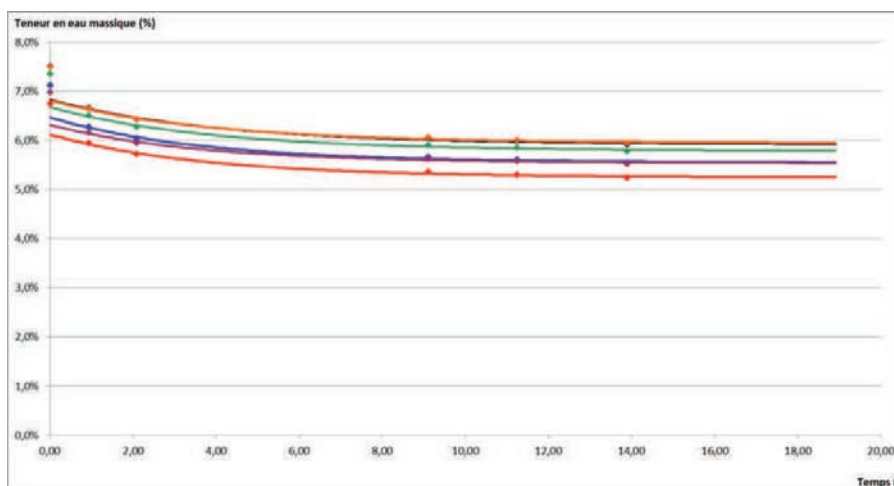


Figure 4.7 Cinétique de désorption – SI2C Référence – 58 → 43% HR
Points : Valeurs expérimentales / Ligne : Modélisation

Le Tableau 4.4 présente les valeurs finales obtenues pour les coefficients a, b et c en fonction des humidités relatives en adsorption et désorption. On vérifie qu'il n'existe pas de corrélation entre les coefficients et l'humidité relative.

	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,007	0,004	0,005	0,011	0,024	0,029	0,044	0,086
	b			0,718	0,871	0,635	0,541	0,383	0,830	0,870	0,937
	c			-1,330	-1,048	-0,222	-0,086	-0,167	-0,219	-0,118	-0,051
	we			0,010	0,014	0,019	0,030	0,053	0,083	0,128	0,215
	R ²			0,994	0,985	0,953	0,900	0,851	0,994	0,992	0,998
Désorption	a	0,006	-0,010	-0,016		-0,015	-0,033	-0,024	-0,074		
	b	0,850	0,850	0,610		0,568	0,465	0,633	0,639		
	c	-0,326	-0,122	-1,057		-0,264	-0,473	-0,394	-0,395		
	we	0,037	0,030	0,041		0,057	0,072	0,106	0,130		
	R ²	0,89	0,9731	0,980		0,938	0,942	0,967	0,975		

	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,002	0,003	0,003	0,006	0,022	0,055	0,114	0,238
	b			0,077	0,184	0,527	0,333	0,414	0,887	0,921	0,976
	c			-0,798	-0,681	-0,474	-0,281	-0,208	-0,205	-0,092	-0,035
	we			0,002	0,005	0,008	0,013	0,036	0,088	0,203	0,438
Désorption	a	0,008	-0,007	-0,010		-0,010	-0,034	-0,044	-0,254		
	b	0,656	0,833	0,357		0,500	0,426	0,725	0,821		
	c	-0,027	-0,144	-0,600		-0,500	-0,554	-0,481	-0,221		
	we	0,023	0,015	0,022		0,032	0,042	0,077	0,118		

Tableau 4.4 Coefficients des paramètres des cinétiques
Haut : SI2C Référence - Bas : Easy-chanvre Référence

+ Isotherme de sorption : Branches principales d'adsorption et de désorption expérimentales

La Figure 4.8 présente les isothermes obtenues pour les formulations SI2C Référence et Easy-chanvre Référence. Les courbes obtenues sont des sigmoïdes. Selon la classification IUPAC il s'agit d'isothermes de type II ou III. Ces types étant obtenus pour des milieux macroporeux, les résultats sont cohérents. De plus, pour les deux formulations les isothermes présentent une hystérésis qui s'étend jusqu'aux hygrométries les plus faibles.

Pour la formulation SI2C Référence, pour les hygrométries faibles et moyennes, la teneur en eau augmente légèrement avec l'hygrométrie : à 58%HR la teneur en eau massique est de 3%. Aux hygrométries les plus fortes, la teneur en eau augmente plus fortement avec l'hygrométrie pour atteindre 21,5% à 97% HR.

Pour la formulation Easy-chanvre Référence, aux hygrométries faibles et moyennes l'évolution de la teneur en eau avec l'hygrométrie est plus faible que celle de la formulation SI2C Référence, en lien avec une porosité ouverte plus faible. A 58% HR la teneur en eau est de 1,3%. Aux hygrométries les plus élevées, la teneur en eau augmente fortement avec l'hygrométrie. A 97% HR, la teneur en eau est de 43,8%. Dans ce domaine d'hygrométrie, la condensation capillaire est intense pour Easy-Chanvre Référence alors qu'elle apparaît progressivement pour SI2C Référence.

Enfin, la Figure 4.9 donne l'évolution de l'hystérésis sur le domaine d'humidité relative. Pour les deux formulations, le Δw présente sa valeur maximale pour une hygrométrie de 81% en lien avec le phénomène de condensation capillaire. Sa valeur est de l'ordre de 4% pour la formulation Easy-Chanvre Référence et légèrement supérieure à 5% pour SI2C Référence. Pour les humidités relatives faibles et moyennes le Δw est compris entre 1,5 et 3% pour Easy-Chanvre et entre 2,5 et 4% pour SI2C.

La fin de la branche de désorption ne ferme pas la boucle, il reste une teneur en eau apparente. Cet écart de masse sèche est expliqué par de l'eau piégée (bouteille d'encre, eau liée chimiquement, etc.) et par d'autres réactions chimiques comme par exemple la carbonatation. Un marquage à la phénolphtaléine a été réalisé après le séchage final ; il s'avère que la carbonatation s'est produite sur une très faible épaisseur : 1 à 2 mm (Figure 4.10).

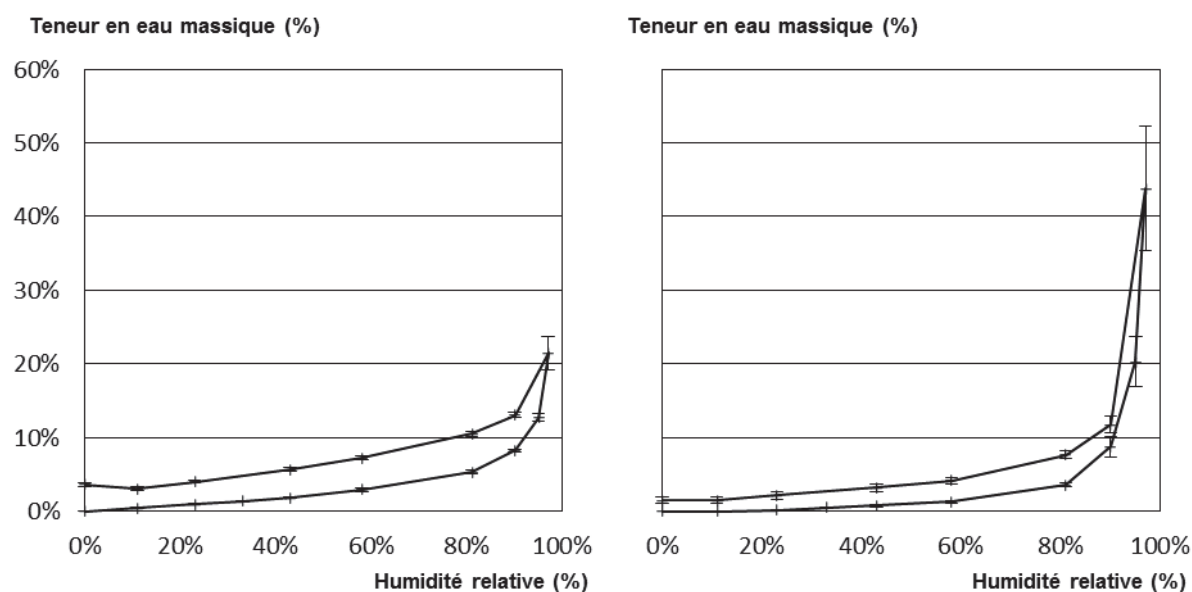


Figure 4.8 Isothermes de sorption – Résultats expérimentaux des formulations Référence
Valeurs moyennes et Ecart-types
Gauche : SI2C Référence – Droite : Easy-Chanvre Référence

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,49%	0,97%	1,37%	1,86%	3,00%	5,32%	8,27%	12,76%	21,47%
	Ecart type	0,00%	0,07%	0,07%	0,09%	0,10%	0,28%	0,23%	0,23%	0,50%	2,26%
Dés.	Moyenne	3,68%	3,03%	4,06%		5,66%	7,25%	10,56%	13,04%		
	Ecart type	0,28%	0,26%	0,26%		0,27%	0,31%	0,32%	0,35%		
Δw		3,68%	2,54%	3,09%		3,80%	4,25%	5,24%	4,77%		

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,00%	0,24%	0,51%	0,78%	1,34%	3,57%	8,81%	20,31%	43,77%
	Ecart type	0,00%	0,00%	0,03%	0,06%	0,18%	0,16%	0,27%	1,36%	3,45%	8,41%
Dés.	Moyenne	1,52%	1,50%	2,19%		3,21%	4,20%	7,71%	11,80%		
	0	0,47%	0,48%	0,49%		0,49%	0,46%	0,49%	1,11%		
Δw		1,52%	1,50%	1,95%		2,42%	2,86%	4,15%	2,99%		

Tableau 4.5 Isotherme de sorption – teneur en eau obtenue par modélisation des cinétiques sur les formulations de Référence
Haut : SI2C – Bas : Easy-Chanvre

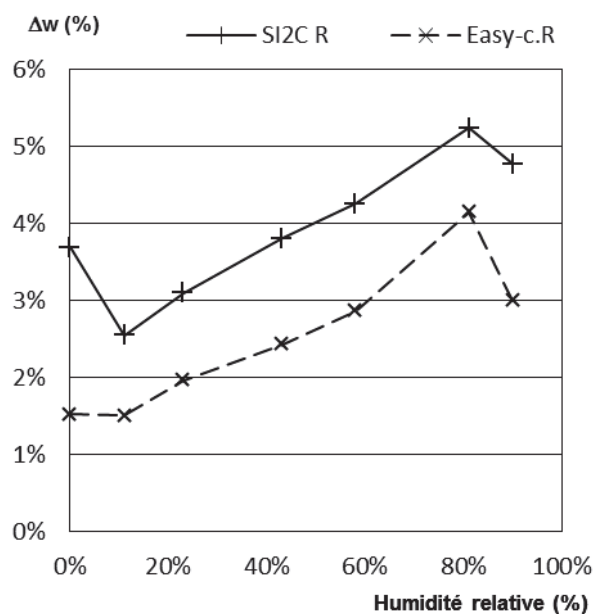


Figure 4.9 Isotherme de sorption des formulations références
Evolution de l'hystérésis sur le domaine d'humidité relative



Figure 4.10 Marquage à la phénolphtaléine après séchage final sur l'échantillon Easy R-44.15

- + Sélections du modèle
- Modèles linéarisés

La Figure 4.11 et la Figure 4.12 présentent l'isotherme de sorption de la formulation SI2C Référence sous la forme linéarisée des modèles BET et GAB. Le Tableau 4.6 donne les paramètres obtenus lors de l'ajustement des modèles sur les points expérimentaux.

La Figure 4.11 montre une évolution linéaire jusqu'à 58%HR correspondant à une zone d'adsorption polymoléculaire. Le modèle BET linéarisé est donc appliqué sur la plage 0-58% HR. On observe une très forte corrélation entre le modèle BET linéarisé et les points expérimentaux (R^2 très proche de 1). Le résultat obtenu donne une teneur en eau monomoléculaire w_m de 1,55% et une surface spécifique de 51,7 m²/g.

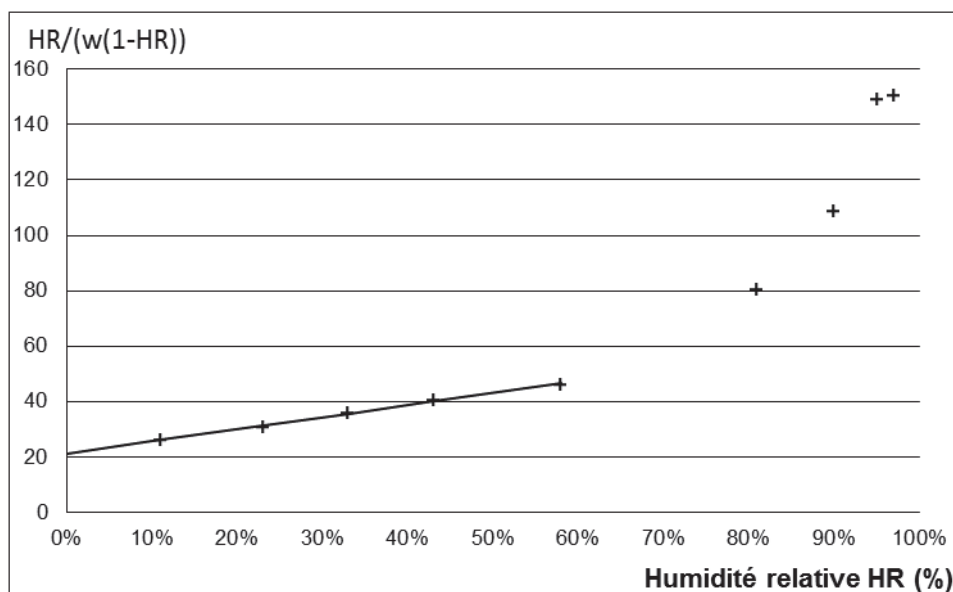


Figure 4.11 Isotherme de sorption sous la forme BET linéarisé – SI2C Référence
Points : Valeurs expérimentales / Ligne : Modélisation

La Figure 4.12 montre une évolution linéaire jusqu'à 90%HR correspondant à une adsorption polymoléculaire. On observe ensuite une chute qui apparaît en liaison avec la condensation capillaire. Le modèle GAB est ajusté sur le domaine 0-90%HR. On observe une très forte corrélation entre le modèle GAB linéarisé et les points expérimentaux (R^2 très proche de 1). La teneur en eau monomoléculaire obtenue est de 1,71% et la surface spécifique est de 57,2m²/g. L'écart par rapport au modèle BET est de 10%.

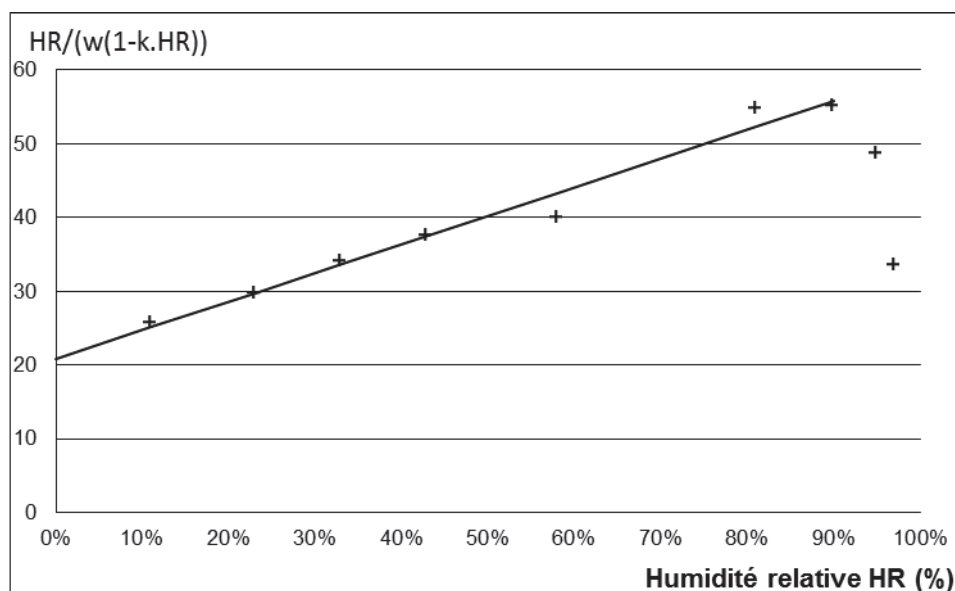


Figure 4.12 Isotherme de sorption sous la forme GAB linéarisé – SI2C Référence
Points : Valeurs expérimentales / Ligne : Modélisation

Modèle	BET linéarisé				GAB linéarisé				
Paramètre	w _m	C	R ²	A ²	w _m	C	K	R ²	A ²
	1,55%	1,491	0,998	51,742	1,71%	2,967	0,892	0,988	57,203

Tableau 4.6 Paramètres des modèles GAB et BET Linéarisés – SI2C Référence
Ajustement du modèle BET linéarisé sur la plage 0-58%HR
Ajustement du modèle GAB linéarisé sur la plage 0-90%HR

- Ensemble des modèles

Afin d'identifier le modèle le plus pertinent à utiliser dans la suite de l'étude, l'ensemble des modèles est appliqué à l'isotherme de sorption de la formulation SI2C Référence (Figure 4.13 - Tableau 4.7). Le modèle retenu servira en effet pour le calcul de la diffusivité hydrique.

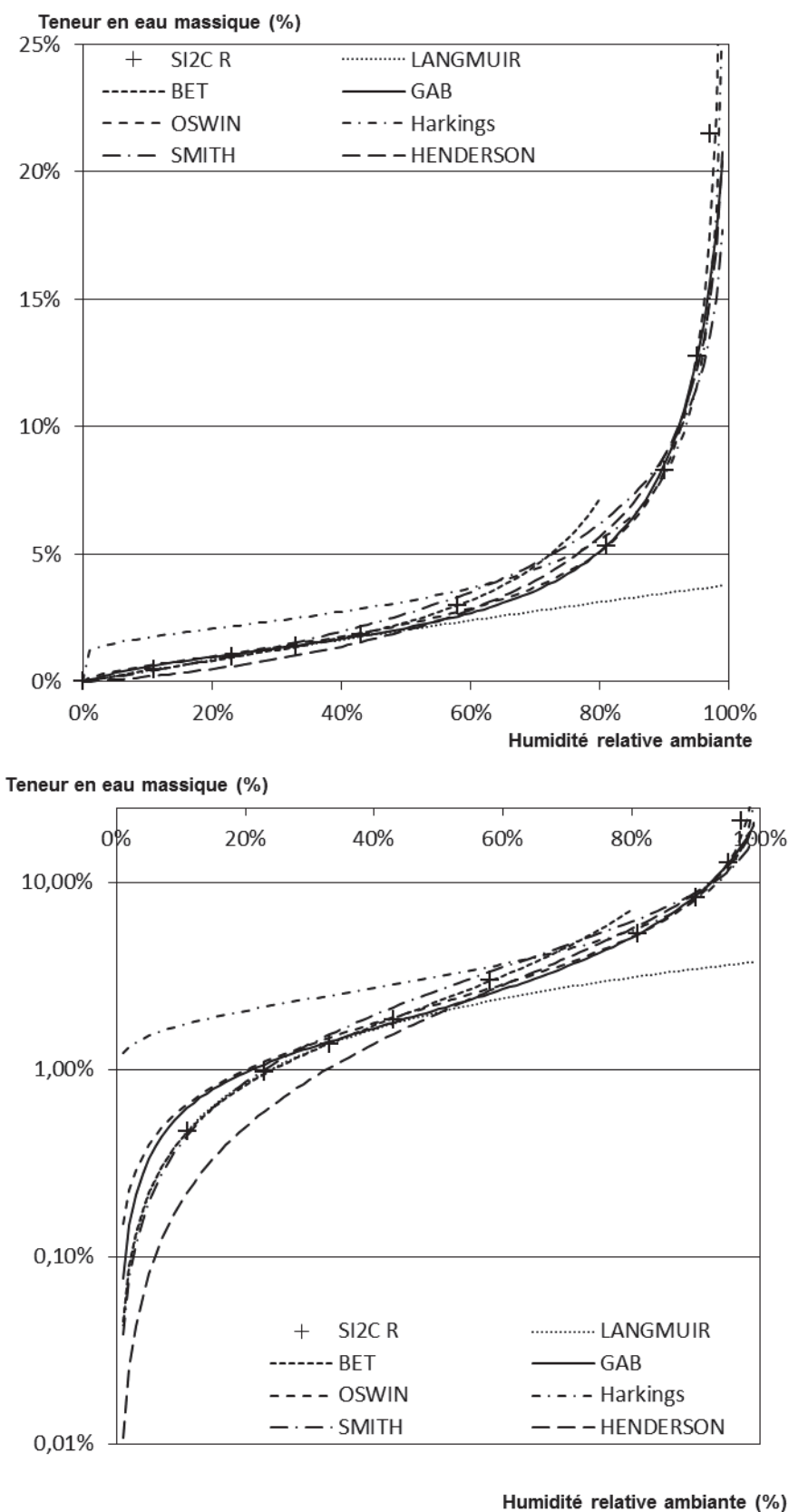
Le modèle de Langmuir décrivant l'adsorption monomoléculaire est appliqué sur la plage 0-33%HR. Le modèle BET décrivant l'adsorption polymoléculaire est ajusté sur la plage 0-58%HR. Les autres modèles sont quant à eux ajustés sur la plage 0-95%HR. En effet, il s'agit de définir une équation permettant de décrire l'isotherme de sorption sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie.

L'ensemble des modèles présente un coefficient de corrélation R^2 très élevé (supérieurs à 0,99). Les modèles de Langmuir et BET décrivent correctement l'évolution expérimentale sur leurs domaines de validité. Cependant ils sont écartés car le modèle

retenu devra décrire l'ensemble du domaine d'hygrométrie. Les autres modèles permettent de décrire une isotherme sigmoïde et présentent des résultats similaires entre eux. Cependant, aux faibles et moyennes hygrométries, le modèle de Harkings conduit à des valeurs plus élevées alors que le modèle de Henderson présente des valeurs plus faibles que celles obtenues expérimentalement et par les autres modèles. Le modèle de Smith décrit correctement l'évolution de la teneur en eau jusqu'aux hygrométries moyennes. Ensuite il donne des valeurs trop élevées de teneur en eau jusqu'à 90%HR puis à des valeurs trop faibles aux hygrométries plus fortes. Les modèles d'Oswin et GAB conduisent à des courbes très comparables qui permettent de décrire correctement l'évolution de la teneur en eau sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie. Le modèle de GAB est celui qui est retenu pour la suite de l'étude car il est plus facilement dérivable que celui d'Oswin.

Modèle	Langmuir			GAB			
Paramètre	w _m	C	R ²	w _m	C	K	R ²
	0,288	0,152	1,0000	0,013	6,560	0,946	0,9989
Modèle	BET			Oswin			
Paramètre	w _m	C	R ²	A	B	C	R ²
	0,016	2,954	0,9998	0,00011	0,00008	1,697	0,9995
Modèle	HARKINGS			HENDERSON			
Paramètre	k	n	R ²	A	B	C	R ²
	0,000	0,001	0,9928	0,025	640,638	0,811	0,9956
Modèle	SMITH						
Paramètre	k	n	R ²				
	0,000	0,039	0,9901				

Tableau 4.7 Paramètres des modèles – SI2C Référence
Ajustement du modèle Langmuir sur la plage 0-33%
Ajustement du modèle BET sur la plage 0-58%HR
Ajustement des autres modèles sur la plage 0-95%HR



+ Isotherme de sorption : résultats expérimentaux et modèle

La Figure 4.14 et le Tableau 4.8 présentent l'ajustement du modèle GAB aux résultats expérimentaux pour les formulations SI2C Référence et Easy-Chanvre Référence. Pour les deux formulations le coefficient de corrélation R^2 est proche de 1. Le modèle GAB étant ajusté sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie, les w_m obtenus ne sont pas les valeurs exactes du point de vue physique. La teneur en eau monomoléculaire obtenue pour la formulation SI2C Référence est de 1,3%. Celle de la formulation Easy-Chanvre Référence est 0,9%. Ces valeurs étant liées aux surfaces spécifiques des matériaux, la formulation SI2C Référence a donc une plus grande surface spécifique qu'Easy-Chanvre Référence. La valeur de C, en liaison avec la chaleur d'adsorption de la première couche, est plus élevée pour SI2C Référence que pour Easy-Chanvre Référence alors que la valeur de K, représentative des énergies de liaisons pour les autres couches est similaire pour les deux formulations (voisine de 1).

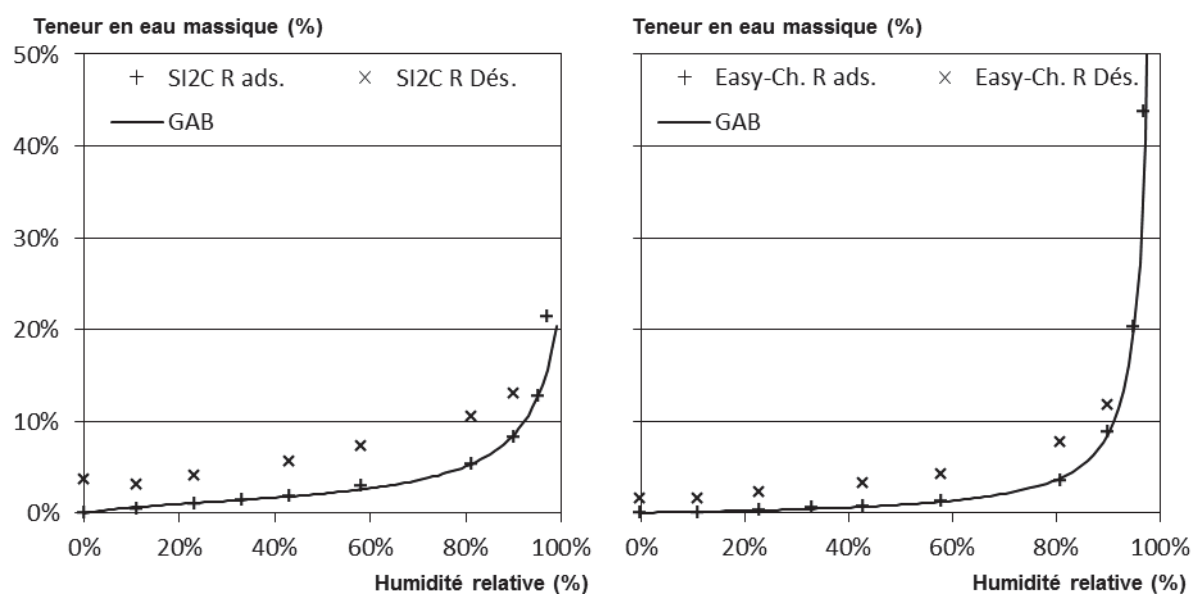


Figure 4.14 Isotherme de sorption des formulations de référence
Points expérimentaux et modèle GAB
Gauche : SI2C Référence – Droite : Easy-Chanvre Référence

Modèle	GAB			
Paramètre	w_m	C	K	R^2
SI2C Référence	0,013	6,560	0,946	0,999
Easy-chanvre Référence	0,009	0,947	1,009	1,000

Tableau 4.8 Paramètres du modèle GAB des formulations de référence

b. Perméabilité à la vapeur

+ Cinétique expérimentale

La Figure 4.15 présente un exemple de cinétique obtenue lors de d'un essai de perméabilité à la vapeur. Cette courbe est représentative de l'ensemble des cinétiques obtenues lors des essais aux différentes hygrométries. Sur cette cinétique, on identifie dans un premier temps le régime transitoire. Le régime permanent est atteint au bout de six à douze jours en fonction des couples d'hygrométries. L'essai est alors poursuivi durant trente à quarante jours jusqu'à saturation des sels ou de la solution saline. Durant cette phase de régime permanent, l'évolution de la masse en fonction du temps décrit une droite qui présente un fort coefficient de corrélation.

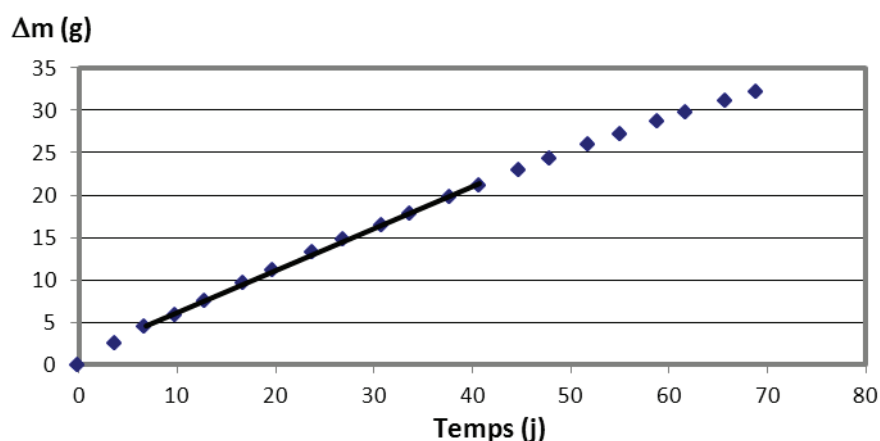


Figure 4.15 Cinétique expérimentale – Essai normatif 0-50 % – SI2C Référence

+ Evolution de la perméabilité avec l'hygrométrie

La Figure 4.15 et le Tableau 4.10 présentent l'évolution de la perméabilité à la vapeur en fonction des couples humidité relative. Sur la figure le point est placé au niveau de la moyenne entre HR_i et HR_e .

Les perméabilités à la vapeur pour le couple d'humidité (0 ; 50) sont similaires pour les deux formulations ($2,92$ et $2,93 \cdot 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$) conduisant à des facteurs de résistance à la vapeur d'eau de 6,68 et 6,66. Ces résultats sont comparables aux valeurs données par Evrard [EVR, 06] ($5,02$ pour 400 kg.m^{-3} et $7,68$ pour 466 kg.m^{-3}).

Les deux formulations présentent des valeurs et des évolutions de perméabilité similaires. Aux faibles et moyennes hygrométries, la perméabilité à la vapeur présente une valeur quasiment constante : aux alentours de $3,6 \cdot 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ pour SI2C Référence et de $4,3 \cdot 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ pour Easy-Chanvre Référence. Aux fortes humidités, la perméabilité à la vapeur augmente fortement pour atteindre $2,13 \cdot 10^{-10} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ pour SI2C Référence et $1,46 \cdot 10^{-10} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ pour Easy-Chanvre Référence.

L'augmentation de la perméabilité à la vapeur en fonction de l'hygrométrie est liée au transfert liquide associé à la diffusion liquide surfacique puis à la condensation capillaire.

L'évolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de l'hygrométrie est décrite par une loi puissance ($\pi = A + B.HR^C$) dont les coefficients sont donnés dans le Tableau 4.10. Lors de l'ajustement de ce modèle, les points [23 ; 33] sont écartés pour les deux formulations.

	Hr _i	0	0	23	23	43	58	81	81
	Hr _e	50	23	33	43	58	81	90	94
SI2C Référence	$\pi \times 10^{11}$ [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]	2.92	3.24	13.90	3.86	4.82	5.32	17.48	21.30
	R ²	0.998	0.994	0.993	1.000	0.999	0.995	0.995	0.996
Easy-Chanvre Référence	$\pi \times 10^{11}$ [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]	2.93	4.42	11.23	5.83	4.83	5.64	13.36	14.57
	R ²	0.998	0.991	0.993	1.000	0.999	0.997	0.994	0.996

Tableau 4.9 Valeurs expérimentales de la perméabilité à la vapeur en fonction des couples (Hr_i, Hr_e) des formulations SI2C et Easy-chanvre Référence

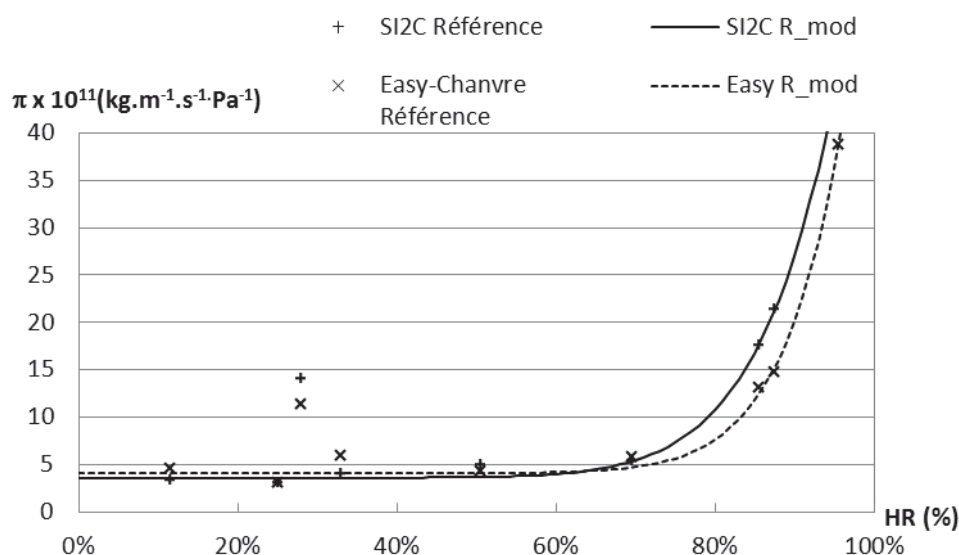


Figure 4.16 Perméabilité à la vapeur et modèle – Référence

Formulation	A × 10 ¹¹	B × 10 ¹¹	C
SI2C Référence	3.619	67.489	10.060
Easy- Chanvre Référence	4.301	61.685	12.815

Tableau 4.10 Paramètres du modèle de perméabilité à la vapeur – Référence

c. Diffusivité

La Figure 4.17 présente l'évolution de la diffusivité hydrique en fonction de la teneur en eau. La diffusivité hydrique est calculée en fonction de l'humidité relative à partir de l'évolution de la perméabilité à la vapeur et de l'isotherme de sorption selon l'équation E 3.29. L'évolution en fonction de la teneur en eau est donnée en liaison avec l'isotherme de sorption.

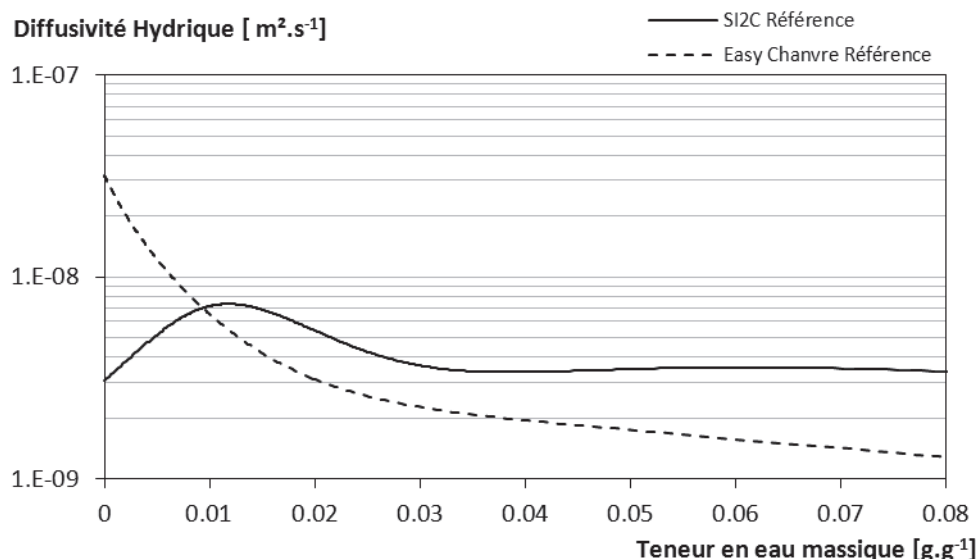


Figure 4.17 Diffusivité hydrique en fonction de la teneur en eau – Référence

La diffusivité hydrique est comprise entre 1.10^{-9} et $3.10^{-8} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. L'allure des courbes est en accord avec la théorie de De Vries. On observe la première partie de la courbe caractéristique de la diffusion sous forme vapeur. Pour la formulation Easy-Chanvre Référence, seule la décroissance est observée. Pour des teneurs en eau inférieures à 0,8%, la diffusivité hydrique de la formulation Easy-Chanvre Référence est plus forte que celle de la formulation SI2C Référence ensuite elle devient plus faible et présente une décroissance tout au long du domaine observé. Pour la formulation SI2C Référence, dans un premier temps la diffusivité hydrique augmente avec la teneur en eau. Le transfert d'humidité se produit par diffusion et effusion de vapeur ensuite la diffusivité hydrique décroît en lien avec l'apparition du transfert sous forme liquide. A partir d'une teneur en eau massique de 3%, la diffusivité hydrique est de l'ordre de $3.10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$.

4.2.4 Propriétés Mécaniques

Des essais mécaniques ont été réalisés sur les bétons de chanvre SI2C Référence et Easy Chanvre Référence dans le cadre du Projet ANR Bétonchanvre [MOU,09] [GLO, 11-1]. Ces essais, mis en œuvre par nos partenaires, ont été réalisés sur des échantillons moulés dans des moules prismatiques identiques à ceux utilisés pour la confection des échantillons de cette étude.

Les tests mécaniques correspondent à des tests de compression simple, pilotés en vitesse de compression, conformément aux préconisations de l'association construire en chanvre [GLO, 11-2].

Les éprouvettes comprimées correspondent soit à des blocs entiers, soit des demi-blocs, comprimés verticalement ou horizontalement.

Les contraintes maximales atteintes lors de la compression de ces blocs sont présentées sur la Figure 4.18 en fonction de la masse volumique apparente.

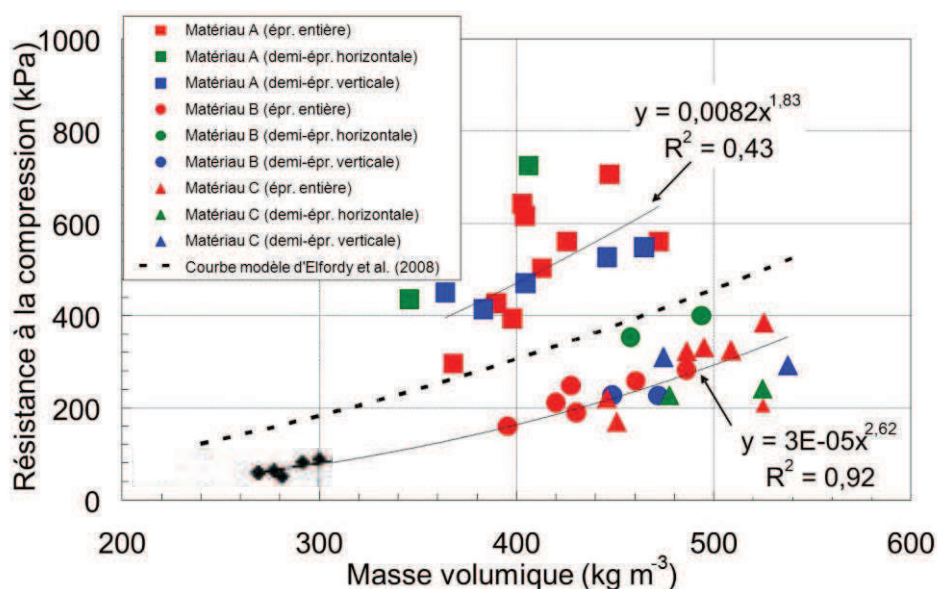


Figure 4.18 Contrainte maximale de compression sur les bétons de chanvre de référence
Type A = SI2C R, Type B et type C = Easy chanvre R, d'après [GLO, 11-1].

On constate que les résultats sont très bruités mais présentent cependant une évolution largement influencée par la masse volumique. La composition en liant (nature et proportion) affecte visiblement la résistance en compression des bétons de chanvre. Rappelons que SI2C R est formulé avec un liant partiellement hydraulique alors que Easy Chanvre R est majoritairement constitué de chaux aérienne.

Extrapoler la résistance du béton de chanvre à partir de la résistance du liant constitutif semble inadapté (réponse du modèle d'Elfordy [ELF, 08] présenté sur la Figure 4.18 pour le liant du béton de chanvre SI2C : $\sigma = \sigma_0(\rho/\rho_0)^2$).

L'interprétation de l'effet de la forme et de la taille de l'échantillon sur la résistance en compression n'est pas aisée. Cet effet, pour autant qu'il soit sensible, est parasité par la dispersion des mesures.

Les deux gammes de masses volumiques des échantillons Easy chanvre (type B et type C) testés permettent d'ajuster une loi puissance sur les résultats.

Pour exploiter ces mesures, nous retenons les régressions de référence :

SI2C R : $R_c = 0,0082 \rho^{1,83}$

Easy Chanvre R : $R_c = 0,00003 \rho^{2,62}$

4.3 Formulations de bétons de chanvre de type « Variante : Taux de compactage »

Par rapport à la formulation de référence, les variantes V1 et V2 comprennent plus de liants. La variante V1 comprend en outre un ajout de mélasse et levure. La variante V2 est également plus compactée.

4.3.1 Séchage et propriétés physiques

De la même façon que pour les formulations de référence, les échantillons sont confinés dans leur moule durant huit jours. Ils sont démoulés et stabilisés en salle de retrait. Le suivi de la cinétique est réalisé durant cent jours. La durée de séchage est de soixante-quinze jours. La perte de masse entre l'état initial et le séchage final est de 42% pour les deux formulations de type « Taux de compactage ».

Le Tableau 4.11 donne les masses volumiques apparentes pour les différents taux de compactage et rappelle les valeurs de la formulation de Référence. On constate que la variante 1 présente une masse volumique apparente très proche de celle de la référence, alors que la variante 2 présente une masse volumique supérieure d'environ 20%.

Formulation	$\rho_{app\ moy} [kg.m^{-3}]$	Ecart-type	nb blocs
Easy- Chanvre Référence	460,1	29,1	11,0
Easy- Chanvre Variante 1	466,4	18,8	6
Easy- Chanvre Variante 2	550,4	14,4	7

Tableau 4.11 Masse volumique apparentes des blocs - Variante « Taux de compactage »

Le Tableau 4.12 montre que la masse volumique réelle mesurée est identique pour les variantes 1 et 2. Ces valeurs sous-estiment respectivement de 9 et 11% la masse volumique théorique et sont supérieures d'environ 6% à celle de la formulation de référence. La porosité totale de la variante 1 est comparable à celle de la formulation de référence et légèrement supérieure à celle de la variante 2 (68,7 à 73,5%). La porosité ouverte des variantes 1 et 2 sont comparables (autour de 63%) et supérieure à celle de la formulation de référence (54%).

	n_0	$\rho_{reel} [kg.m^{-3}]$	n
Easy-Chanvre Référence	54.0%	1655.84	72.2%
Easy-Chanvre Variante 1	61.7%	1758.36	73.5%
Easy-Chanvre Variante 2	64.0%	1758.11	68.7%

Tableau 4.12 Autres caractéristiques physiques - Variante « Taux de compactage »

4.3.2 Propriétés hydriques

a. Stockage : Isothermes de sorption

La Figure 4.19 et le Tableau 4.13 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présentent les points expérimentaux et l'ajustement du modèle GAB à ceux-ci pour les variantes 1 et 2.

Les isothermes obtenues sont des sigmoïdes de type II ou III (Classification IUPAC) qui présentent une hystérésis.

En adsorption, sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie, la variante 2 présente des teneurs en eau comparables à celles de la formulation de référence. Jusqu'à une humidité relative de 81% la teneur en eau de la variante 2 est légèrement supérieure à celle de la formulation de référence (écart maximum de teneur en eau de 0,55%). Inversement, au-delà, les teneurs en eau de la formulation de référence sont supérieures. A 97%HR, la teneur en eau de la formulation Référence est de 43% alors qu'elle est de 28,9% pour V2 bien que cette formulation ait la plus grande porosité ouverte. Ainsi, l'ajustement du modèle GAB aux points expérimentaux conduit à une teneur en eau monomoléculaire similaire à celle de la formulation de référence pour la variante 2. Par contre, la valeur de C est beaucoup plus élevée pour la variante 2 que pour la formulation de référence (rapport de 11,6), montrant une chaleur d'adsorption de la première couche plus forte. La valeur de K, représentative des énergies de liaisons des autres couches, est proche de 1 dans tous les cas.

La branche d'adsorption de la variante 1 présente les teneurs en eau les plus élevées sur tout le domaine d'hygrométrie. A 97%HR, la teneur en eau atteint 64,6%. Le modèle GAB donne alors la teneur en eau monomoléculaire la plus élevée, conduisant à une surface spécifique plus grande en lien avec une porosité ouverte plus importante pour V1 que pour la référence. Comme pour la variante 2, la valeur de C est beaucoup plus forte que pour la formulation de référence et la valeur de K est proche de 1. Enfin, la dérivée de l'isotherme de sorption de la variante 1 est plus élevée que celles de la variante 2 et de la formulation de Référence. Ceci conduit à une capacité tampon hydrique plus forte.

Modèle	GAB			
Paramètre	w _m	C	K	R ²
Easy-chanvre Référence	0,009	0,947	1,009	1,000
Easy-chanvre Variante 1	0,012	8,010	1,012	1,000
Easy-chanvre variante 2	0,008	11,008	0,994	0,998

Tableau 4.13 Paramètres du modèle GAB des formulations Variantes « Taux de Compactage »

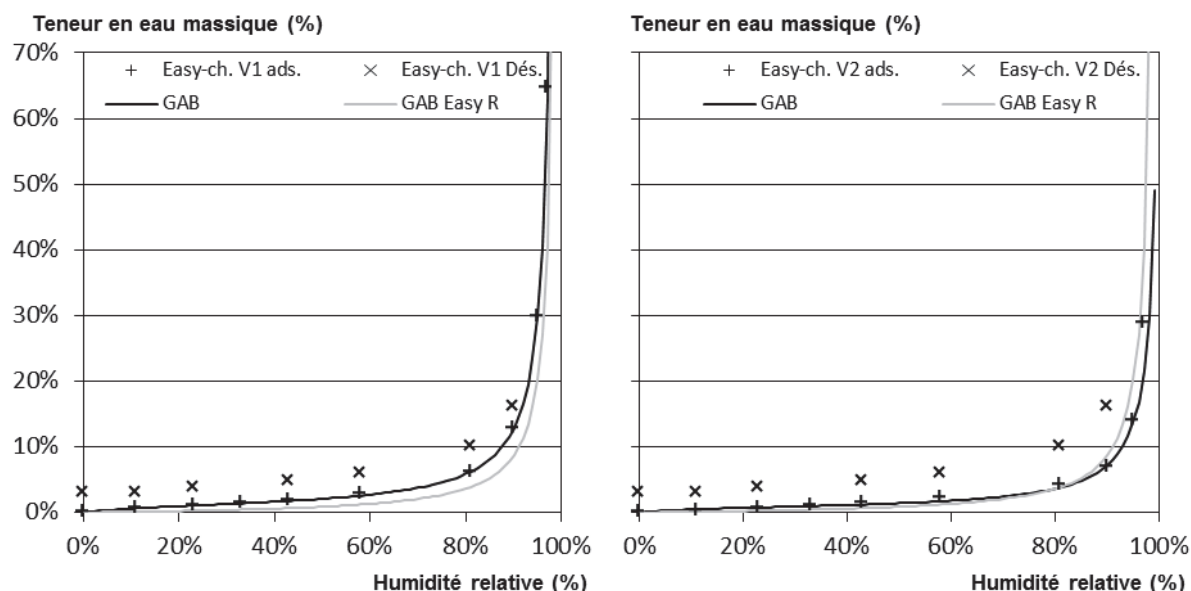


Figure 4.19 Isotherme de sorption des formulations Variante « Taux de compactage »

Points expérimentaux et modèle GAB

Gauche : Easy-Chanvre Variante 1 – Droite : Easy-Chanvre Variante 2

La Figure 4.21 donne l'évolution de l'hystérésis sur le domaine d'humidité relative. Pour l'ensemble des formulations, le Δw présente sa valeur maximale pour une hygrométrie de 81% en lien avec le phénomène de condensation capillaire. Sa valeur est de l'ordre de 4% pour la Variante 1 et la Référence et légèrement supérieure à 3% pour la variante 2. Pour les humidités relatives faibles et moyennes le Δw est compris entre 2,5 et 3% pour les deux variantes, l'hystérésis reste donc plus marquée pour les variantes que pour la formulation de référence.

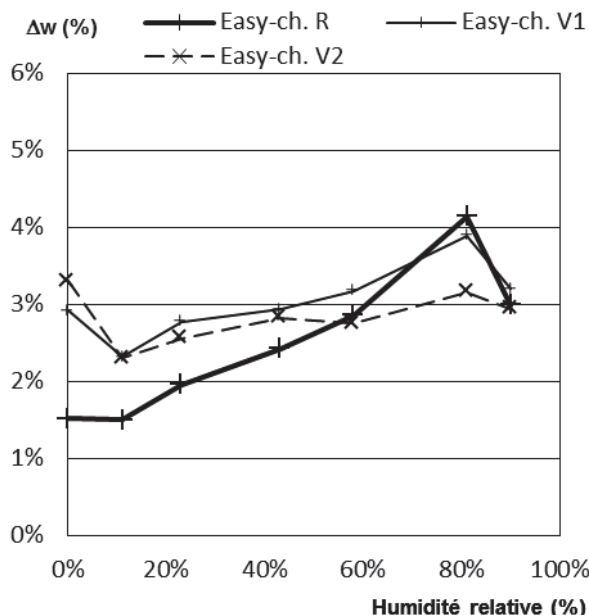


Figure 4.20 Isotherme de sorption des formulations Variante « Taux de compactage »

Evolution de l'hystérésis sur le domaine d'humidité relative

b. Transfert : Perméabilité à la vapeur et diffusivité hydrique

L'évolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de l'hygrométrie est donnée Figure 4.21 pour les différents taux de compactage. Les points de l'essai 23/33 ont été écartés lors de l'ajustement du modèle puissance pour les deux formulations, ainsi que le point 43/58 pour la formulation V1. La campagne expérimentale donne accès uniquement aux faibles et moyennes hygrométries. Ainsi, pour la plage d'hygrométrie inférieure à 80%, les trois formulations présentent des perméabilités à la vapeur équivalentes. La perméabilité à la vapeur montre une légère croissance à partir de 25% HR environ. D'autre part, la diffusivité hydrique de la formulation V2 présente une valeur maximale supérieure à celle de la formulation V1 (respectivement 11,3 et $8,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Ces valeurs maximales sont atteintes pour des teneurs en eau correspondant à des hygrométries équivalentes, autour de 25% HR. Cette hygrométrie **équivalent** à l'atteinte de la teneur en eau monomoléculaire. Le transfert liquide surfacique se met donc en place, conduisant à une augmentation de la perméabilité à la vapeur et à la diminution de la diffusivité hydrique.

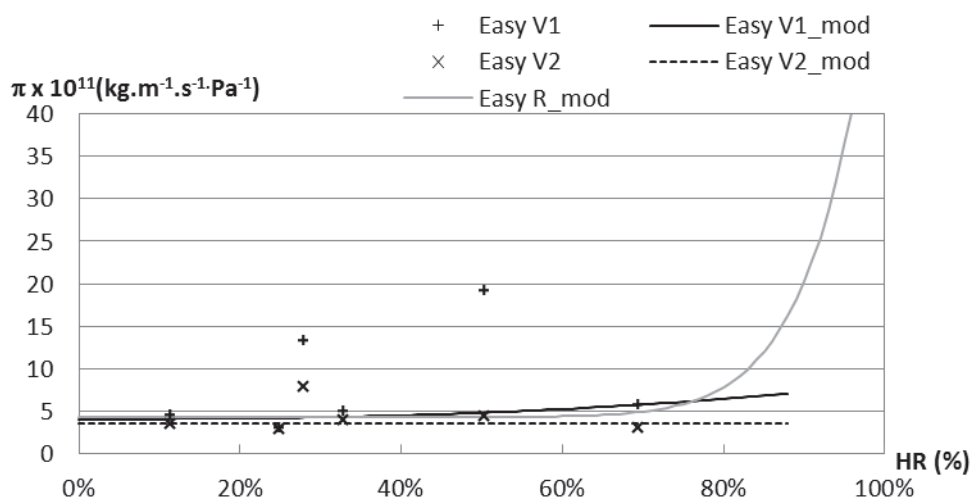


Figure 4.21 Perméabilité à la vapeur et modèle – Variante « Taux de compactage »

Formulation	$A \times 10^{11}$	$B \times 10^{11}$	C
Easy- Chanvre Référence	4.301	61.685	12.815
Easy- Chanvre Variante 1	4.056	4.147	2.468
Easy- Chanvre Variante 2	3.513	0.000	1.000

Tableau 4.14 Paramètres du modèle de perméabilité à la vapeur – Variante « Taux de compactage »

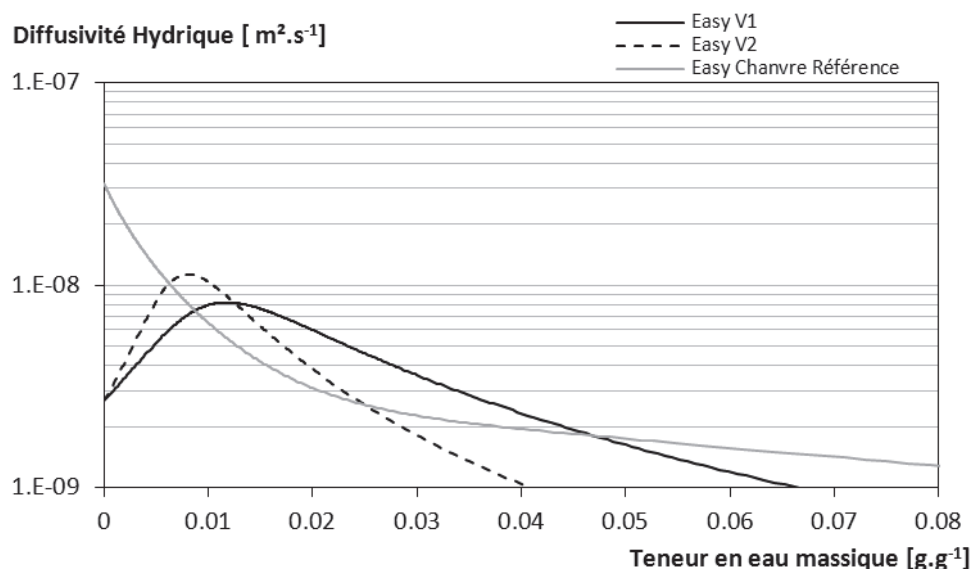


Figure 4.22 Diffusivité hydrique en fonction de la teneur en eau – Variante « Taux de compactage »

L'ajout de mélasse et levure (formulation V1) conduit donc à une porosité ouverte plus grande, permettant un stockage et un transfert plus important de l'humidité que pour la formulation de référence. La variante 2, plus dense, présente à la fois une porosité ouverte plus forte et une porosité totale plus faible. Le stockage et le transfert d'humidité y sont moins importants que pour V1 en lien avec un réseau poreux moins favorable.

4.4 Formulations de bétons de chanvre de type « Variante : Taux de liant »

La formulation de référence a un rapport Liant/Chanvre de 4/2, la variante Dalle a un rapport 5/2 et la variante Toiture a un rapport 2/2. Dans tous les cas le liant est du Tradical PF70 et les chènevottes sont du chanvribat.

4.4.1 Séchage et Propriétés physiques

Le protocole de séchage est identique à celui des échantillons de référence. La durée de séchage est de trente-six jours pour la formulation toiture et de quarante-huit jours pour la formulation Dalle. La perte de masse entre l'état initial et le séchage final est de 41% pour la formulation de type toiture et de 25% pour la formulation de type Dalle. Au global la perte de masse absolue est similaire pour l'ensemble des formulations : autour de 2200-2400 g. En toute logique, la durée de séchage est plus longue pour la formulation la plus dense.

Le Tableau 4.15 donne les masses volumiques apparentes pour les différents dosages en liant et rappelle les valeurs de la formulation de Référence. On constate que la masse volumique apparente de la formulation de type Dalle est supérieure de 10% à celle de la formulation de référence. Par contre la formulation de type Toiture présente une masse volumique apparente très inférieure (de 40%).

La masse volumique réelle de la formulation Dalle est plus élevée que celle de la formulation de référence, elle-même plus élevée que celle de la formulation toiture. Cette évolution est corrélée avec le dosage en liant et est moins marquée sur les valeurs expérimentales que sur les valeurs théoriques (Ecart compris entre -5 et +9%).

La formulation de type Dalle a une porosité totale équivalente à la formulation de référence tout en ayant une porosité ouverte et une masse volumique réelle plus importantes. Ceci peut s'expliquer par une teneur en air occlus plus élevée dans la pâte de SI2C Dalle. Cette porosité paraît plus connectée. La formulation Toiture présente une porosité totale de 85% qui est plus élevée que celle de la formulation de référence. Cette porosité est majoritairement ouverte (74%) liée à l'enchevêtrement des chènevottes, peu saturé par la pâte de liant.

Formulation	$\rho_{app\ moy} [kg.m^{-3}]$	Ecart-type	nb blocs
SI2C Référence	421,6	27,6	20
SI2C Dalle	460,3	36,1	9
SI2C Toiture	252,8	35,6	9

Tableau 4.15 Masse volumique apparentes des blocs - Variante « Taux de Liant »

	n_0	$\rho_{\text{reel}} [\text{kg.m}^{-3}]$	n
SI2C Référence	60.2%	1996.53	78.9%
SI2C Dalle	66.7%	2170.17	78.8%
SI2C Toiture	74.0%	1677.67	84.9%

Tableau 4.16 Autres caractéristiques physiques - Variante « Taux de Liant »

4.4.2 Propriétés hydriques

a. Stockage : Isothermes de sorption

L'ajustement du modèle GAB aux données expérimentales des formulations Dalle et Toiture sont donnés Tableau 4.17 et Figure 4.23.

Comme pour la formulation de référence, les isothermes obtenues sont des sigmoïdes de type II ou III (Classification IUPAC) qui présentent une hystérésis. Aux faibles et moyennes humidités relatives, les isothermes obtenues pour les formulations Référence, Toiture et Dalle sont comparables. Les teneurs en eau monomoléculaires (resp. Surfaces spécifiques) sont similaires pour les formulations de Référence et Toiture et plus faible pour la formulation Dalle. Aux fortes hygrométries, où se produit la condensation capillaire, la formulation Toiture présente les teneurs en eau les plus élevées alors que les formulations Référence et Dalle restent comparables entre elles.

Dans tous les cas, les teneurs en eau obtenues pour les bétons de chanvre, quel que soit le dosage en liant, sont inférieures à celles obtenues pour le chanvre seul (qu'il s'agisse de teneur en eau massique ou volumique).

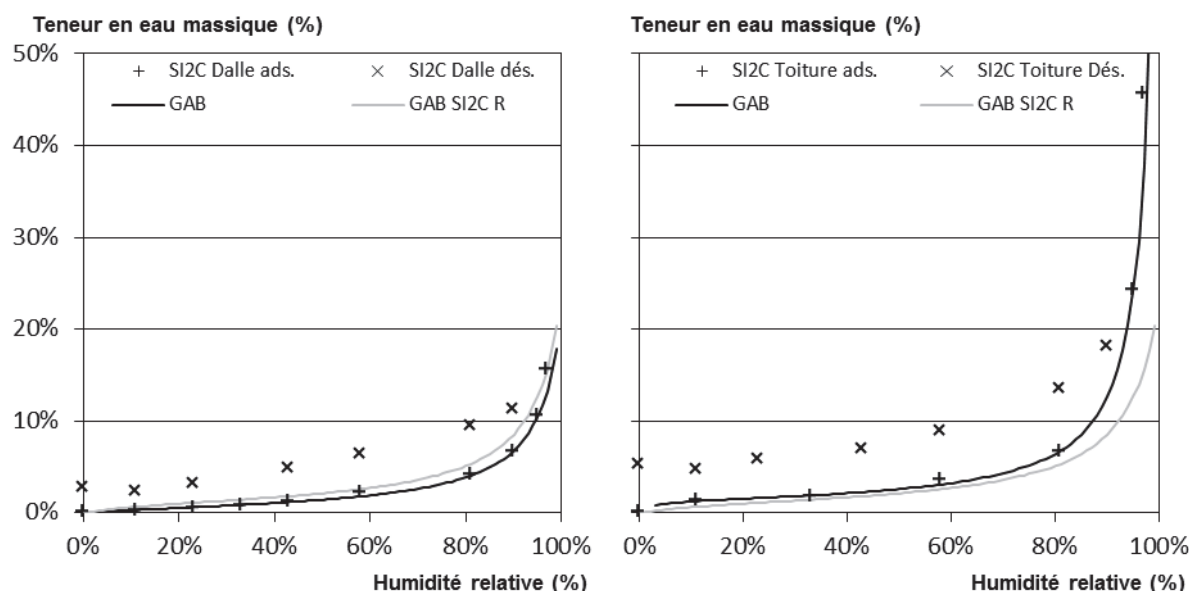


Figure 4.23 Isotherme de sorption des formulations Variante « Taux de Liant »

Points expérimentaux et modèle GAB

Gauche : SI2C Dalle – Droite : SI2C Toiture

Modèle	GAB			
Paramètre	w _m	C	K	R ²
SI2C Référence	0,013	6,560	0,946	0,999
SI2C Dalle	0,010	2,935	0,954	0,999
SI2C Toiture	0,013	43,625	0,995	1,000

Tableau 4.17 Paramètres du modèle GAB des formulations Variantes « Taux de Liant »

Afin d'identifier l'effet du dosage en liant sur les isothermes de sorption, la Figure 4.24 présente l'évolution de la teneur en eau volumique en fonction du rapport Chanvre/liant pour différentes hygrométries. La valeur Chanvre/liant nulle correspond au liant seul et la valeur chanvre/liant égale à 1 correspond à la formulation Toiture.

Aux faibles et moyennes humidités relatives, où la fixation de l'humidité se fait par adsorption polymoléculaire, les teneurs en eau volumiques diminuent avec le dosage en chanvre. Ceci est corrélé avec le fait que la surface spécifique est principalement développée dans le liant (Tableau 4.17).

Aux plus fortes humidités, la condensation capillaire se produit dans les pores de petites tailles situés dans le liant ou dans les parois des canaux des chènevottes. Ainsi on observe les valeurs les plus élevées pour le liant seul et pour les forts dosages en chanvre.

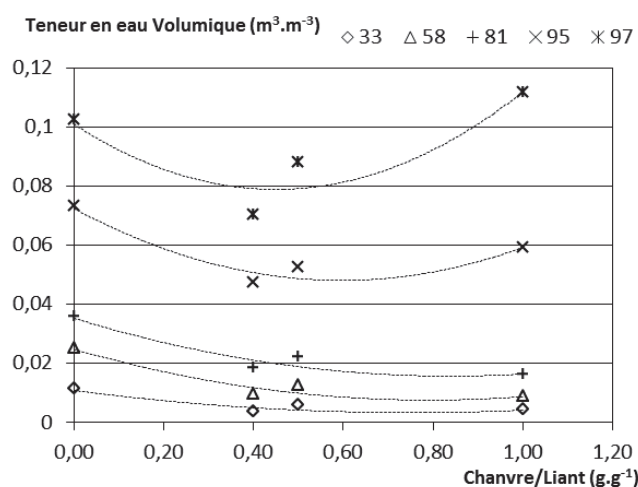


Figure 4.24 Evolution de la teneur en eau volumique en fonction du rapport Chanvre/Liant pour différentes hygrométries

La Figure 4.25 présente l'évolution d'hystérésis sur le domaine d'hygrométrie pour les formulations Référence, Dalle et Toiture. Pour l'ensemble de ces formulations, l'hystérésis est présente sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie et le maximum est atteint pour une hygrométrie de 81%. Les formulations Référence et Dalle présentent des valeurs similaires comprises entre 2,1 et 5,1%. Pour la formulation Toiture, l'hystérésis est plus importante et varie entre 3,5 et 7%.

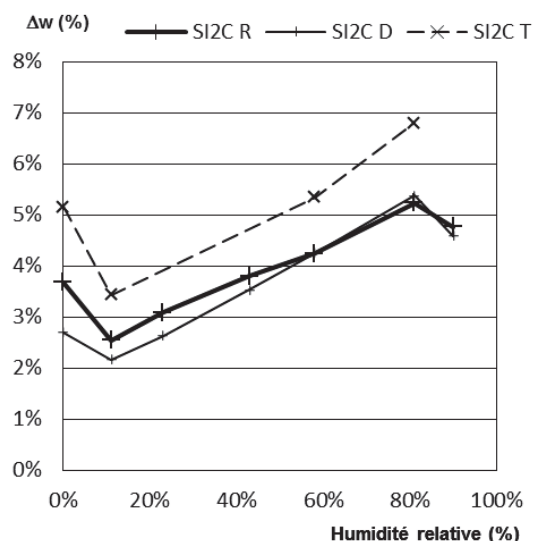


Figure 4.25 Evolution de l'hystérésis sur le domaine d'humidité relative pour les formulations Variantes « Taux de liant »

b. Transfert : Perméabilité à la vapeur et diffusivité hydrique

La formulation Toiture n'a pas pu être caractérisée d'un point de vue transferts hydriques du fait de son manque de cohésion.

Les résultats obtenus en perméabilité à la vapeur et diffusivité hydrique pour la formulation Dalle sont présentés Figure 4.26, Figure 4.27 et Tableau 4.18. Comme précédemment, l'évolution de la perméabilité est explorée pour les faibles et moyennes hygrométries (jusqu'à 58/81 %HR). L'ajustement du modèle puissance est réalisé en écartant le point 23/33 qui semble suspect, comme dans les formulations présentées précédemment.

Jusqu'à 60% HR, la perméabilité à la vapeur obtenue pour la formulation Dalle est comparable à celle de la formulation de référence. Au-delà, alors que la formulation de référence présente une augmentation marquée de la perméabilité à la vapeur, associée au développement du transfert liquide, la formulation Dalle présente une évolution plus faible. La diffusivité hydrique maximale de la formulation Dalle est légèrement supérieure à celle de la formulation de référence. Cette valeur est atteinte pour des teneurs en eau plus faibles. La porosité ouverte de la formulation Dalle étant plus importante que celle de la formulation de référence, son réseau poreux est probablement plus fin et plus tortueux, conduisant à une valeur maximale de la diffusivité hydrique pour des teneurs en eau plus faibles et à une perméabilité à la vapeur plus faible également pour les hygrométries les plus importantes.

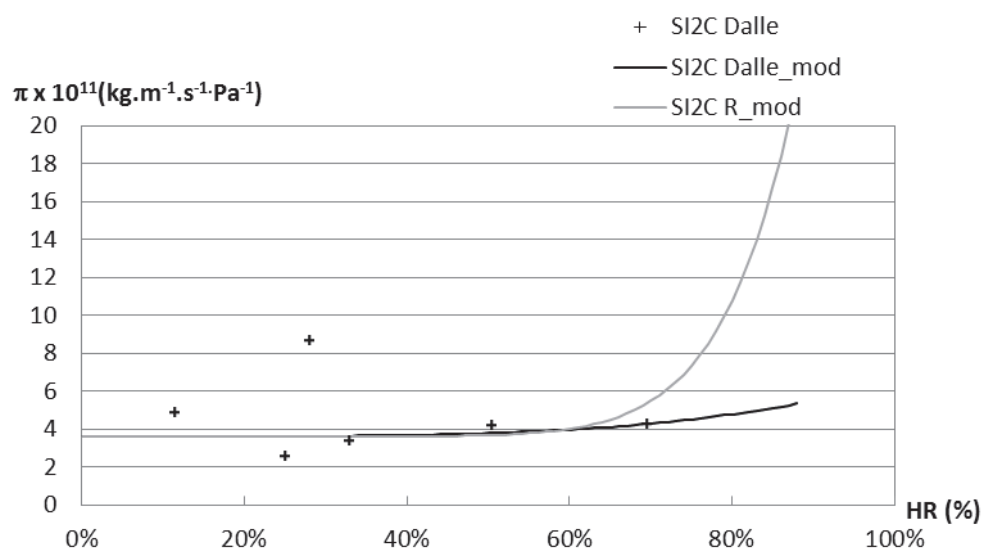


Figure 4.26 Perméabilité à la vapeur et modèle – Variante « Taux de Liant »

Formulation	$A \times 10^{11}$	$B \times 10^{11}$	C
SI2C Référence	3.619	67.489	10.060
SI2C Dalle	3.614	2.921	4.061

Tableau 4.18 Paramètres du modèle de perméabilité à la vapeur – Variante « Taux de Liant »

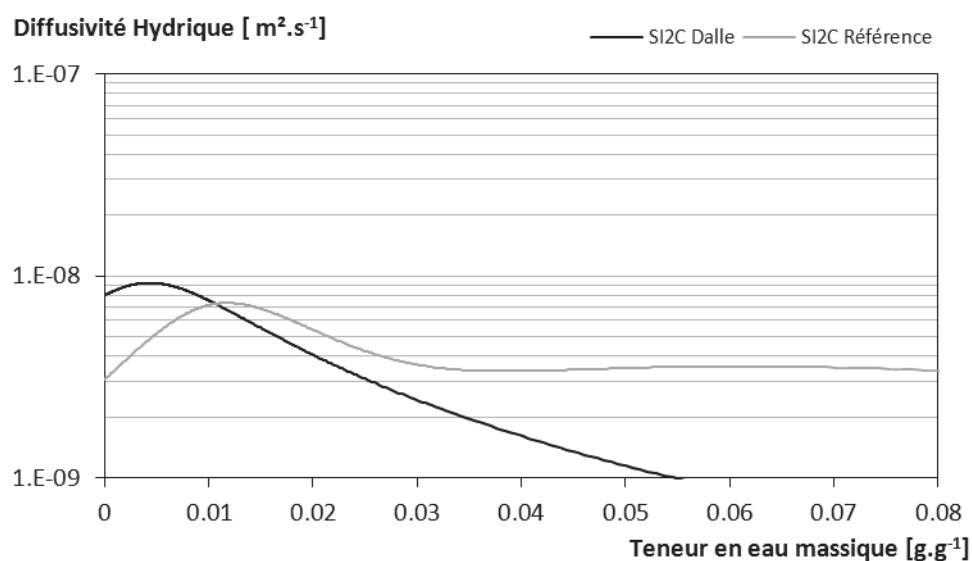


Figure 4.27 Diffusivité hydrique en fonction de la teneur en eau – Variante « Taux de Liant »

4.5 Formulations de bétons de chanvre de type « Variante : Type de liant »

Les formulations étudiées ici sont réalisées en substituant du Microcem au Tradical PF70. Les compositions du liant sont alors :

- pour la formulation Laboratoire F1 : 1/3 Microcem – 2/3 Tradical PF70,
- pour la formulation Laboratoire F3 : 1/2 Microcem – 1/2 Tradical PF70,
- pour la formulation Laboratoire F4 : 2/3 Microcem – 1/3 Tradical PF70.

4.5.1 Séchage et Propriétés physiques

Le séchage des différentes formulations laboratoire dure 40 jours, comme pour la formulation de référence. L'évolution des taux d'évaporation est similaire pour les trois formulations laboratoire, en lien avec le dosage en eau. Les taux d'évaporation sont plus faibles que pour la formulation de référence entre 0 et 18 jours, puis sont comparables. Les pertes de masse entre l'état initial et final sont autour de 28%.

Les masses volumiques apparentes obtenues sont similaires pour les trois formulations. : Autour de 393 kg.m^{-3} . Elles sont inférieures de 7% à la formulation de référence.

Les masses volumiques réelles mesurées sont en bon accord avec les valeurs théoriques (écart entre 2 et 5%), elles sont comprises entre 1938 et 2051 kg.m^{-3} .

Les porosités totales sont similaires pour les trois formulations : autour de 80%. Elles sont comparables à la formulation de référence. Par contre, la porosité ouverte est inférieure à celle de la formulation de référence, elle augmente avec le dosage en microcem et est comprise entre 50 et 57 %.

Formulation	$\rho_{\text{app moy}} [\text{kg.m}^{-3}]$	Ecart-type	nb blocs
SI2C Référence	421.6	27.6	20.0
Laboratoire F1	392.7	15.6	10.0
Laboratoire F3	393.8	5.5	10.0
Laboratoire F4	394.4	10.6	10.0

Tableau 4.19 Masse volumique apparentes des blocs - Variante « Type de liant »

	n_0	$\rho_{\text{reel}} [\text{kg.m}^{-3}]$	n
SI2C Référence	60.2%	1996.53	78.9%
Laboratoire F1	50.3%	1937.75	79.7%
Laboratoire F3	54.2%	2025.78	80.6%
Laboratoire F4	57.0%	2051.29	80.8%

Tableau 4.20 Autres caractéristiques physiques - Variante « Type de liant »

4.5.2 Propriétés hydriques

a. Stockage : Isothermes de sorption

Les résultats obtenus pour les isothermes de sorption des formulations laboratoires 1, 3 et 4 sont donnés Figure 4.28 à Figure 4.30.

Les isothermes de sorption obtenues pour ces trois formulations sont des sigmoïdes de type II ou III qui présentent une hystérésis sur tout le domaine d'hygrométrie.

Pour des humidités relatives allant jusqu'à 90% HR, les teneurs en eau des formulations F1, F3 et F4 sont comparables à celles de la formulation SI2C Référence et diminuent légèrement avec le dosage en microcem. Aux humidités relatives les plus élevées, la teneur en eau la plus forte est obtenue pour la formulation F4. L'isotherme de la formulation F4 présente alors une pente plus forte que celles des autres formulations. Ainsi, jusqu'à 90% HR, l'ajout de microcem influe peu sur l'isotherme de sorption. Par contre, au-delà, il conduit à une teneur en eau plus élevée.

Les teneurs en eau monomoléculaires obtenues pour les formulations F1 et F3 sont proches de celle de la formulation de référence. Pour la formulation F4, elle est légèrement plus faible indiquant une surface spécifique plus faible. La porosité ouverte étant plus importante, cela pourrait être dû à une taille des grains plus grande.

Modèle	GAB			
Paramètre	w _m	C	K	R ²
SI2C Référence	0,013	6,560	0,946	0,999
Laboratoire F1	0,014	4,074	0,971	0,997
Laboratoire F3	0,013	4,100	0,971	0,995
Laboratoire F4	0,010	1,941	0,996	1,000

Tableau 4.21 Paramètres du modèle GAB des formulations Variantes « Type de Liant »

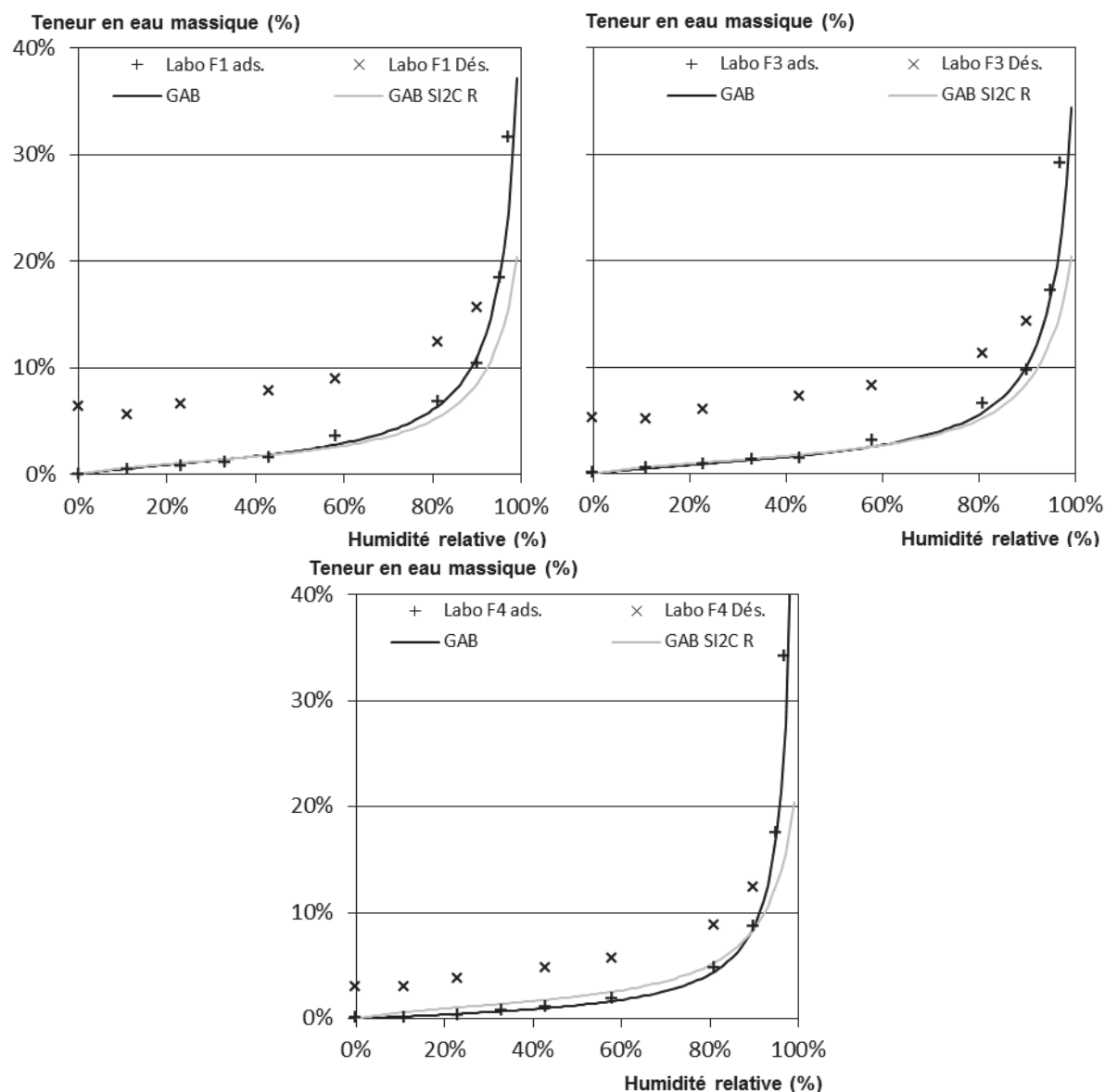


Figure 4.28 Isotherme de sorption des formulations Variante « Type de Liant »
Points expérimentaux et modèle GAB
Haut Gauche : Labo F1 – Haut Droite : Labo F3 / Bas : Labo F4

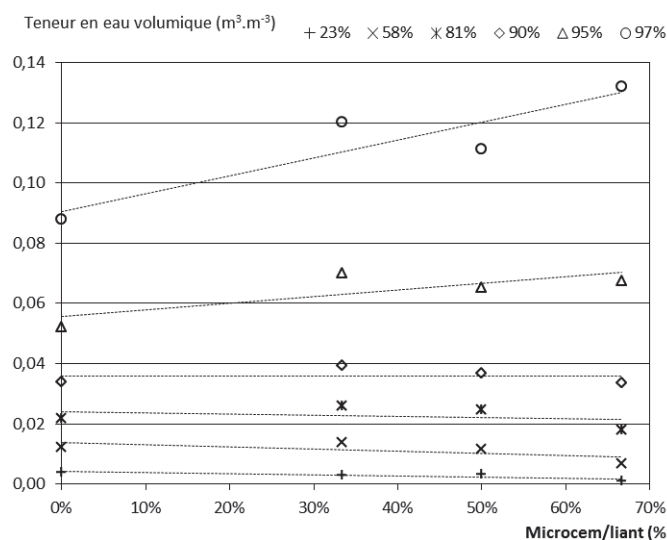


Figure 4.29 Isotherme de sorption des formulations Variante « Type de Liant »
Evolution de la teneur en eau volumique en fonction du taux de microcem dans le liant

Pour les formulations laboratoire, l'hystérésis est constante sur tout le domaine d'hygrométrie. Pour les formulations F1 et F3, le Δw est de l'ordre de 5 à 6% ce qui est comparable avec le maximum de la formulation de Référence. Le maximum est atteint autour de 43%HR témoignant d'une apparition du phénomène de condensation capillaire dès les hygrométries moyennes. Pour la formulation F4, l'hystérésis est plus faible et varie entre 3 et 4%. Comme pour la formulation de référence, le maximum est atteint pour une humidité relative de 81%.

Ainsi, l'ajout de microcem conduit à une hystérésis constante sur le domaine d'hygrométrie. Pour de faibles dosages en microcem, l'hystérésis est amplifiée alors que lorsque le dosage augmente, l'hystérésis diminue.

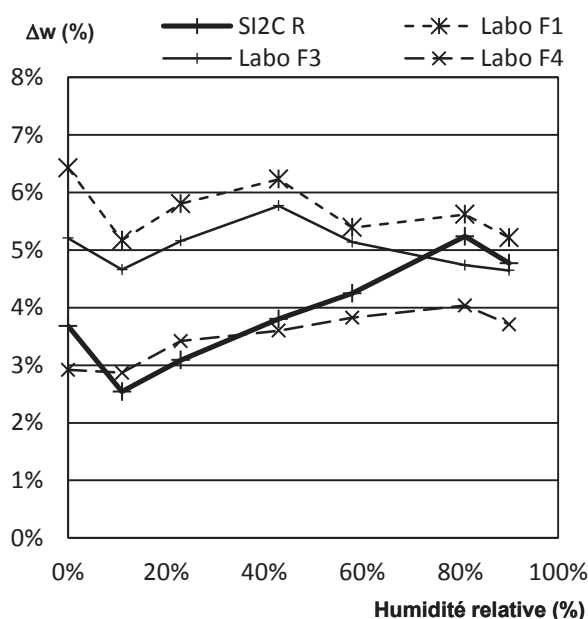


Figure 4.30 Isotherme de sorption des formulations Variante « Type de Liant »
Evolution de l'hystérésis sur le domaine d'humidité relative

b. Transfert : Perméabilité à la vapeur et diffusivité hydrique

Les trois formulations comprenant différents dosages en microcem présentent des perméabilités à la vapeur proches (Figure 4.31). Pour le point normatif 0/50, leur perméabilité est de l'ordre de $3.10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$, ce qui est comparable à celle de la formulation de référence (SI2C-R). Pour les formulations avec du microcem, la perméabilité à la vapeur augmente sur tout le domaine d'hygrométrie et ne présente donc pas de palier caractéristique du transfert sous forme vapeur uniquement.

La Figure 4.32 présente l'évolution de la diffusivité hydrique en fonction de la teneur en eau. La première bosse, relative au transfert sous forme vapeur, selon la théorie de De Vries, apparaît pour toutes les formulations. La diffusivité hydrique des formulations contenant du microcem est supérieure à celle de la formulation de référence. De plus, pour les formulations contenant du microcem, l'augmentation du dosage conduit à des valeurs de diffusivité hydrique plus importantes atteintes pour des teneurs en eau plus faibles (2,6 à 1,1 %) (Figure 4.33). Celles-ci correspondent à des

hygrométries voisines de 50% alors que pour la formulation de référence la valeur maximale de la diffusivité est atteinte pour des teneurs en eau de 1,2 %, autour de 26%HR.

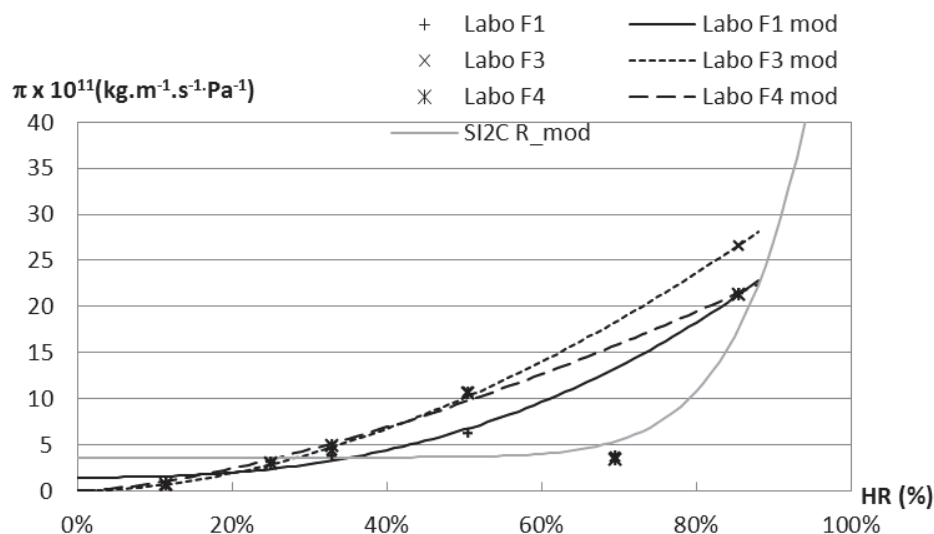


Figure 4.31 Perméabilité à la vapeur et modèle – Variante « Type de Liant »

Formulation	$A \times 10^{11}$	$B \times 10^{11}$	C
SI2C Référence	3.619	67.489	10.060
Laboratoire F1	1.442	29.410	2.505
Laboratoire F3	0.000	35.370	1.811
Laboratoire F4	0.000	27.130	1.495

Tableau 4.22 Paramètres du modèle de perméabilité à la vapeur – Variante « Type de Liant »

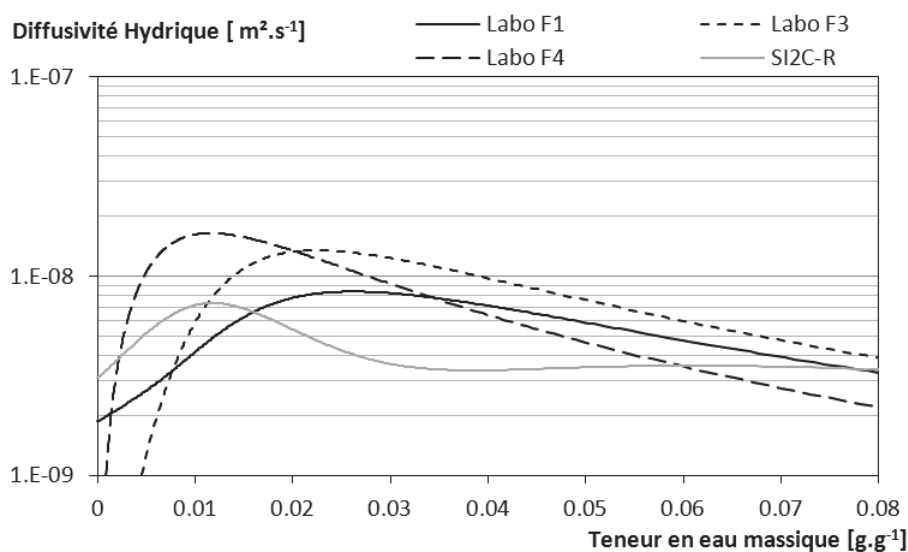


Figure 4.32 Diffusivité hydrique en fonction de la teneur en eau – Variante « Type de Liant »

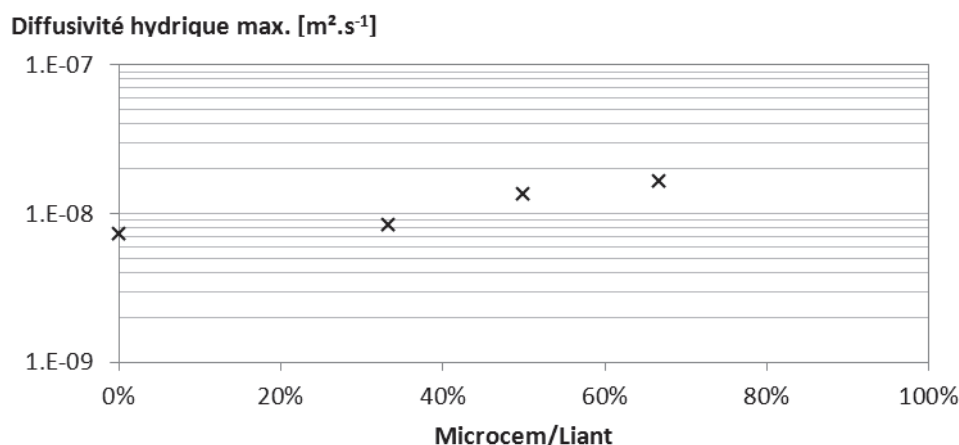


Figure 4.33 Diffusivité hydrique maximale en fonction du dosage initial en microcem dans le liant.

4.5.3 Propriétés Mécaniques

Le Tableau 4.23 présente, pour chaque formulation, la moyenne des résultats obtenus sur les différents échantillons ainsi que la masse volumique. L'ensemble des données expérimentales est donné en Annexe.

	ρ (kg.m ⁻³)	E_{apparent} (MPa)	$E_{\text{élastique}}$ (MPa)	σ_{max} (MPa)	$\varepsilon_{\sigma\text{max}}$ (mm/mm)	$\sigma_{\varepsilon 15\%}$ (MPa)
Formulation 1	428,94	95,39	155,07	0,76	0,02	0,25
Formulation 3	415,31	71,58	114,60	0,62	0,02	0,10
Formulation 4	409,87	59,22	98,41	0,56	0,02	0,15

Tableau 4.23 résultats expérimentaux

La Figure 4.34 présente la contrainte maximale obtenue pour l'ensemble des échantillons des trois formulations en fonction de la masse volumique apparente.

La formulation 1 présente la contrainte maximale la plus élevée (0.76 MPa) alors que la formulation 4 présente la valeur la plus faible (0.56 MPa). Cette valeur est comparable à celle obtenue pour la formulation de référence. Le fait de substituer une partie du liant traditionnel (Tradical PF70) par un sulfate de Calcium (Microcem) conduit tout d'abord à une augmentation sensible des résistances mécaniques du fait des meilleures performances de ce dernier. Ensuite une augmentation du dosage en microcem conduit à une diminution de la résistance mécanique (Figure 4.35) en lien avec une augmentation de la porosité ouverte. Le nuage de points que les formulations F1, F3 et F4 permet de tracer une courbe de tendance liant la contrainte à la rupture σ_{max} à la masse volumique ρ caractéristique de la réponse d'un mélange de liant Tradical PF70 - Microcem.

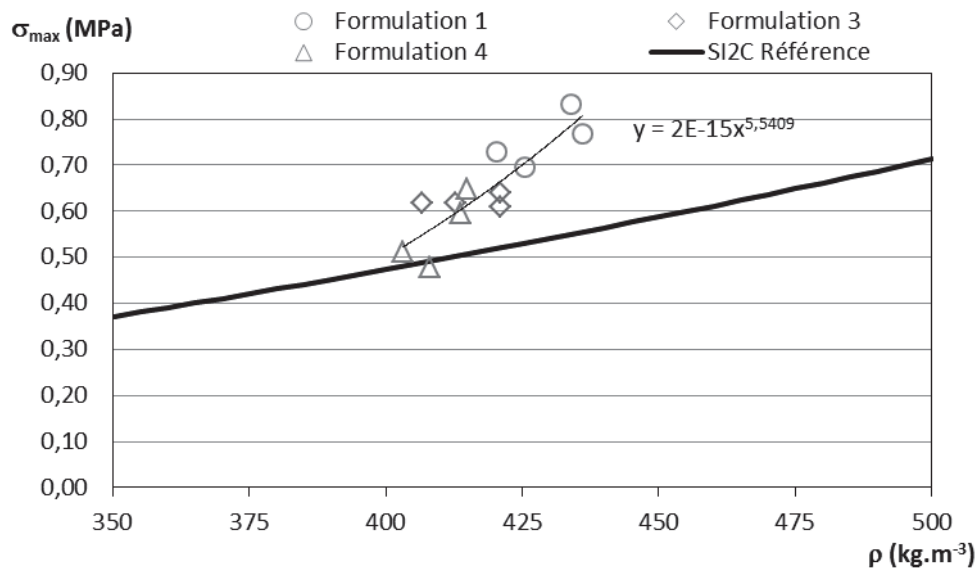


Figure 4.34 Contrainte maximale en fonction de la masse volumique apparente

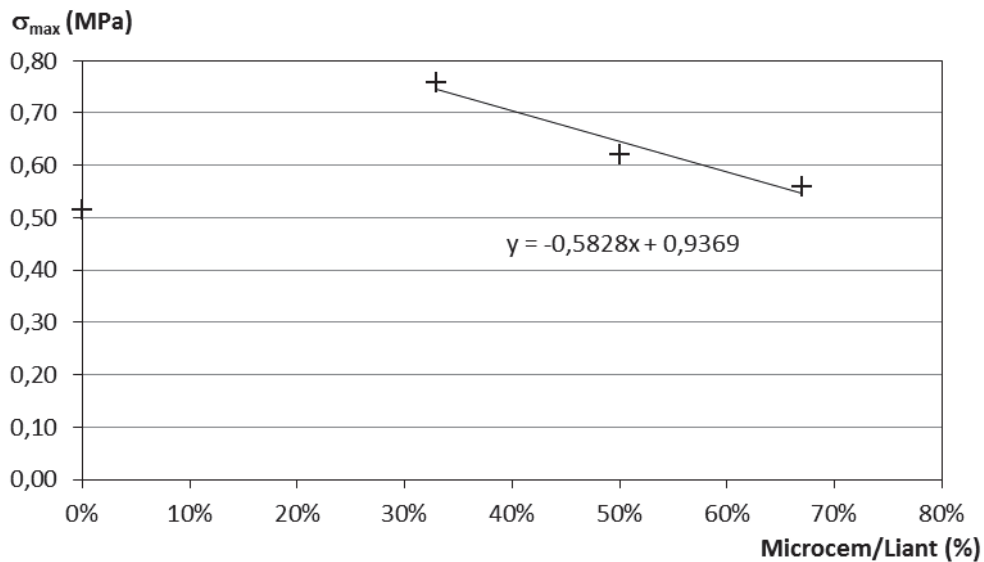


Figure 4.35 Contrainte maximale en fonction du taux de microcem

Les Figure 4.36 et Figure 4.37 présentent les modules de Young Apparent et Elastique en fonction de la masse volumique. La formulation F1 présente les modules les plus élevés (155MPa pour le module Elastique et 95MPa pour le module Apparent). La formulation F4 présente les modules les plus faibles (respectivement 98MPa et 59MPa).

La substitution du liant Tradical PF70 par un sulfate de calcium conduit également à une diminution des modules (Figure 4.38).

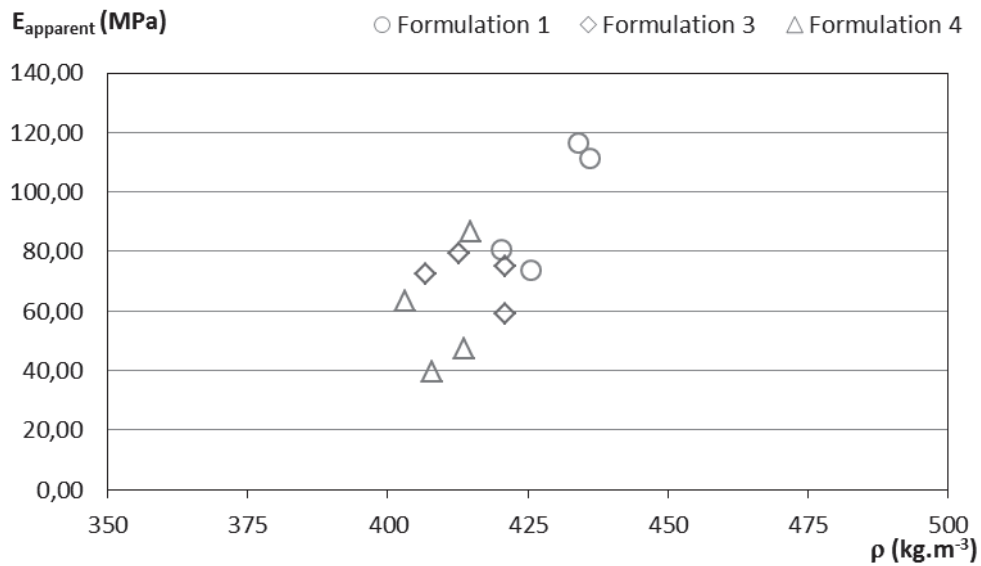


Figure 4.36 Module de Young Apparent en fonction de la masse volumique

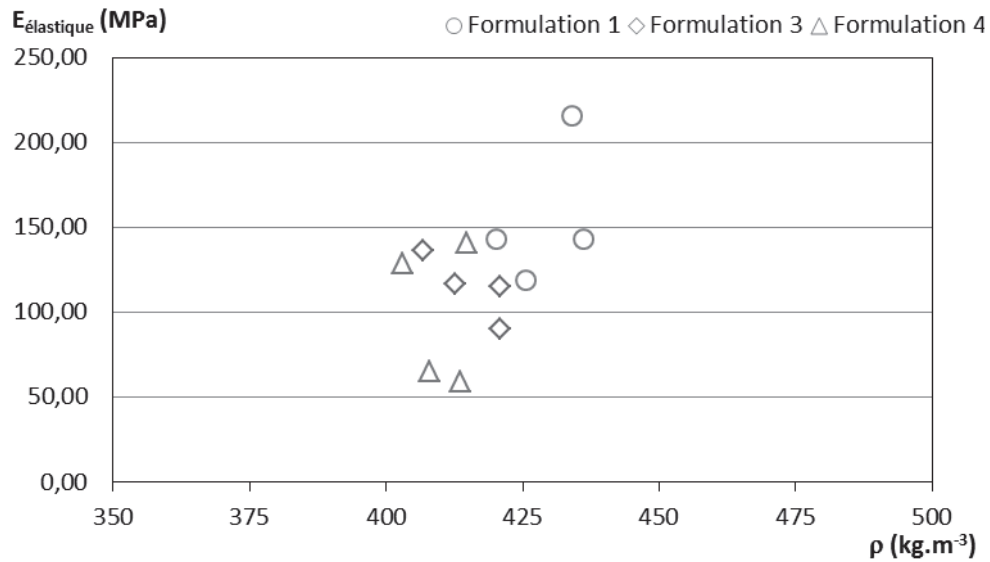


Figure 4.37 Module de Young Elastique en fonction de la masse volumique

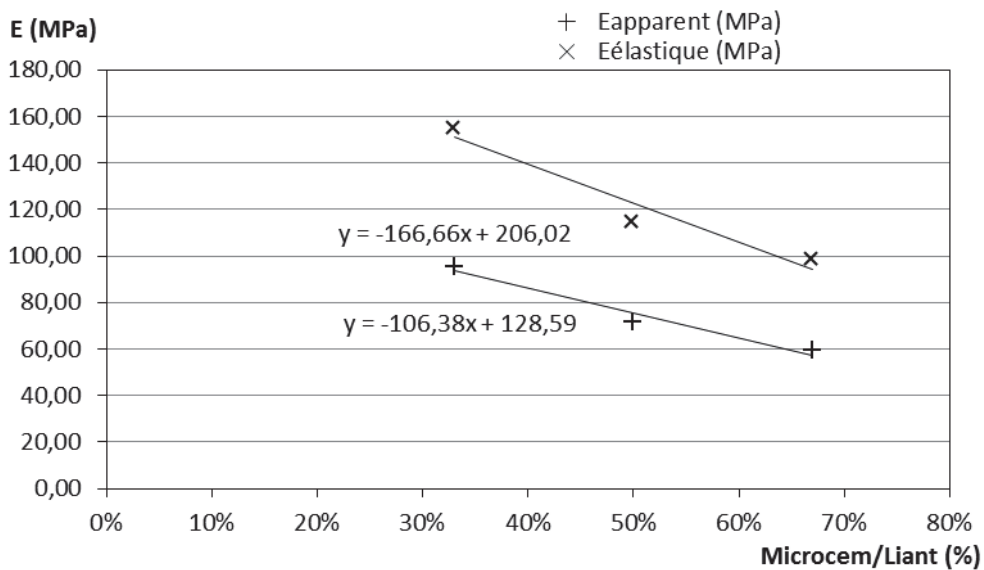


Figure 4.38 Evolution des modules de Young en fonction du taux de microcem

La contrainte résiduelle pour une déformation de 15% est présentée par la Figure 4.39. La dispersion des résultats est plus importante pour la formulation 1 que pour les autres formulations. La contrainte résiduelle la plus élevée est obtenue pour la formulation F1 (environ 0.25MPa) et la plus faible pour la formulation F3 (environ 0.10MPa).

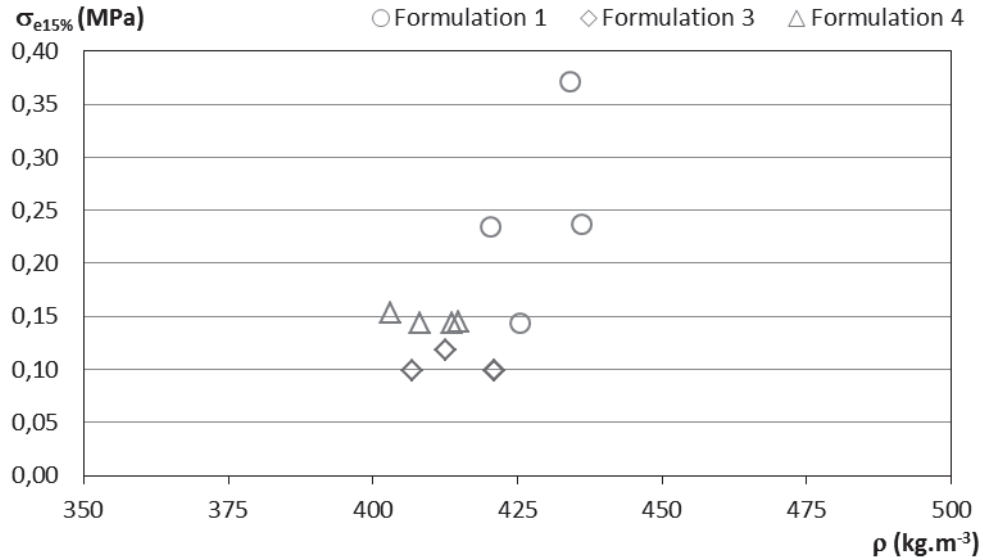


Figure 4.39 Contrainte à une déformation de 15% en fonction de la masse volumique

Au bilan, la formulation F1, qui présente les valeurs maximales en contraintes et en modules, est aussi la plus ductile. Une substitution faible du Tradical PF70 par du microcem améliore les performances mécaniques du béton de chanvre. Par contre, une substitution plus importante pénalise les propriétés. Un dosage optimum en microcem reste à identifier multipliant les analyses pour des taux de substitution compris entre 0 et 30%.

4.6 Formulations de bétons de chanvre de type « Variante : Type de Chanvre »

Différents types de chanvre sont considérés : du chanvre chanvribat traité afin de limiter la quantité d'eau de gâchage et du chanvre fibré Terrachanvre (associé à deux types de liant : du Tradical PF70 ou un mélange 2/3 Tradical PF70 + 1/3 Microcem).

4.6.1 Séchage et propriétés physiques

Les durées de séchage du béton de chanvre avec du chanvre fibré (Référence Terrachanvre et formulation laboratoire 2) sont de l'ordre de 40 jours, comme pour les formulations avec du chanvre non fibré (chanvribat). Les pertes de masse au cours du séchage sont de 40% pour la formulation Terrachanvre référence (plus élevée que pour la formulation SI2C-R : 30%) et de 28 % pour la formulation laboratoire 2 (comparable à la formulation de référence).

Afin d'identifier l'effet du traitement du chanvre sur la cinétique de séchage, un bloc de composition sèche similaire à SI2C-Référence est mis en œuvre de la même façon que le béton de chanvre traité, pour être utilisé comme échantillon témoin. Pour obtenir une consistance satisfaisante, le dosage en eau E/L est alors de 0,83. Ces blocs ont une épaisseur de 7 cm et sèchent sur la tranche (rapport surface d'échange/volume plus grand que pour les formulations précédentes). Les Figure 4.40 et Figure 4.41 présentent l'évolution de la masse volumique et du taux d'évaporation au cours du temps. Après démoulage, le béton de chanvre non traité présente un taux d'évaporation plus fort que le béton de chanvre traité du fait d'une plus grande quantité d'eau excédentaire. Jusqu'au onzième jour, les pentes sont similaires, indiquant une diffusion de l'eau comparable dans les deux matériaux. Le séchage est atteint après 11 jours pour le béton de chanvre non traité et après 17 jours pour le béton de chanvre traité. La perte de masse est de l'ordre de 21 % pour les deux matériaux.

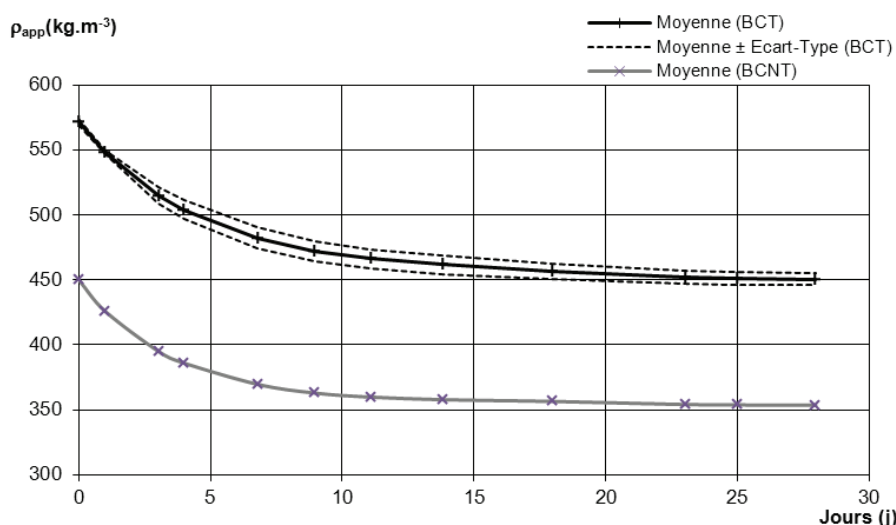


Figure 4.40 Evolution de la masse volumique en fonction du temps – Formulations Béton de Chanvre Traité (BCT) et Référence Béton de Chanvre Non Traité (BCNT)

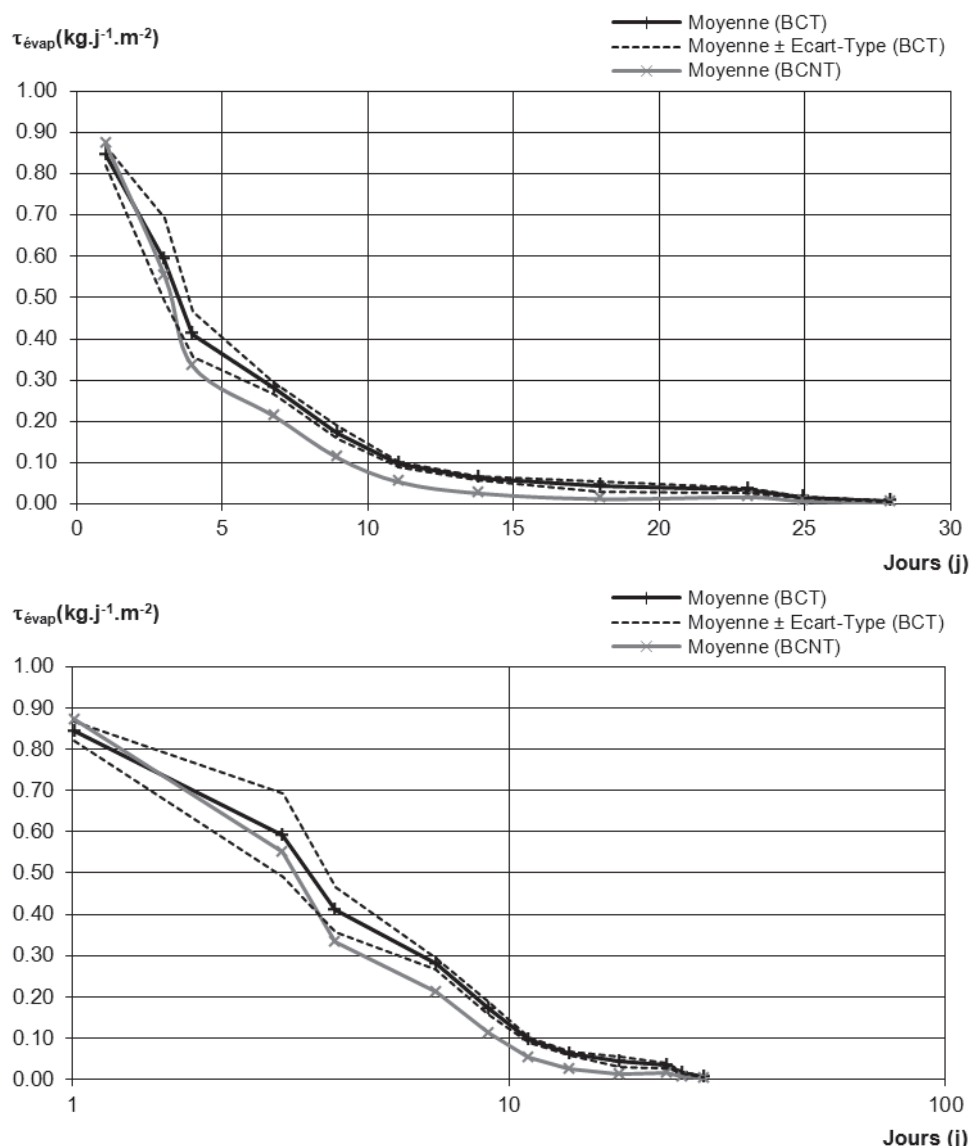


Figure 4.41 Evolution du taux d'évaporation en cours du temps - Formulations Béton de Chanvre Traité (BCT) et Référence Béton de Chanvre Non Traité (BCNT)

La formulation laboratoire 2 présente une masse volumique apparente plus élevée que la formulation 1 (Tableau 4.24). En effet, la masse volumique apparente du chanvre fibré est plus faible que celle du chanvre non fibré (chapitre 1). Ainsi, dans un même volume, l'enchevêtrement des chènevottes conduit à une quantité de liant plus importante en présence de chanvre fibré. La formulation Terrachanvre référence présente quant à elle une masse volumique apparente inférieure de 5% à celle de la formulation de référence SI2C-R, en lien avec le mode de mise en œuvre nécessitant une quantité d'eau excédentaire plus importante.

Les masses volumiques réelles expérimentales sont très proches (autour de 2000 kg.m^{-3}) et supérieures de 5% à la valeur théorique pour la formulation Terrachanvre.

La porosité totale obtenue est comparable pour les deux types de chanvre et de liants. La porosité ouverte est plus élevée pour les formulations réalisées avec du liant Tradical que pour les formulations comprenant du microcem (autour de 60 vs 50%).

Enfin, le chanvre fibré conduit à des porosités ouvertes supérieures d'environ 3% à celles obtenues avec du chanvre non fibré.

Enfin, pour le béton de chanvre traité la masse volumique obtenue (469 kg.m^{-3}) est plus élevée que celle du béton de chanvre non traité (353 kg.m^{-3} pour l'échantillon témoin réalisé et 422 kg.m^{-3} pour la formulation SI2C-R) (Figure 4.40). Le traitement du chanvre conduit donc à une compacité plus élevée du béton de chanvre car il permet de limiter la quantité d'eau excédentaire à la mise en œuvre.

Formulation	$\rho_{\text{app moy}} [\text{kg.m}^{-3}]$	Ecart-type	nb blocs
SI2C Référence	421,6	27,6	20
Terrachanvre Référence	401,3	48,0	8
Béton de chanvre Traité	469,4	5,7	5
Laboratoire 1	392,7	15,6	10
Laboratoire 2	479,8	5,2	4

Tableau 4.24 Masse volumique apparente des blocs - Variante « Type de Chanvre »

	n_0	$\rho_{\text{reel}} [\text{kg.m}^{-3}]$	n
SI2C Référence	60.2%	1996.53	78.9%
Terrachanvre Référence	63.1%	2002.63	80.0%
Laboratoire 1	50.3%	1937.75	79.7%
Laboratoire 2	53.6%	2020.91	76.3%

Tableau 4.25 Autres caractéristiques physiques - Variante « Type de Chanvre »

4.6.2 Propriétés hydriques

a. Stockage : Isothermes de sorption

Les résultats des isothermes de sorption obtenus pour les formulations avec les différents types de chanvre sont donnés Tableau 4.26, Figure 4.42 et Figure 4.43.

Les formulations réalisées avec du chanvre Terrachanvre donnent des branches d'adsorption comparables à celles de leur formulation de référence réalisées avec du chanvre Chanvribat. Les teneurs en eau sont très légèrement inférieures sur toute la branche d'adsorption. Les teneurs en eau monomoléculaire obtenues avec le chanvre fibré sont comparables à celles obtenues avec le chanvre Chanvribat.

Les hystérésis (Figure 4.43) sont également comparables pour les formulations SI2C Référence et Terrachanvre Référence. Pour les formulations Laboratoire, l'hystérésis, comprise entre 4 et 6% sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie, est plus faible (1% en valeur absolue) pour la formulation avec du chanvre fibré.

Le chanvre fibré n'impacte pas notablement l'isotherme de sorption du béton de chanvre.

La formulation réalisée avec du béton de chanvre traité a des teneurs en eau plus faibles que la formulation de référence sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie. L'impact du traitement est d'autant plus important que l'humidité relative est élevée. Ainsi à 58% HR la teneur en eau est plus faible que celle de la formulation de référence d'un tiers alors qu'à 94% la teneur en eau obtenue est 40% plus faible que celle de la formulation de référence (respectivement 7,5 et 11,5%). Le traitement de chanvre empêche l'eau de se fixer sur la chènevotte et de remplir les capillaires des parois des canaux de celle-ci, ce qui conduit à réduire la capacité de sorption du béton de chanvre.

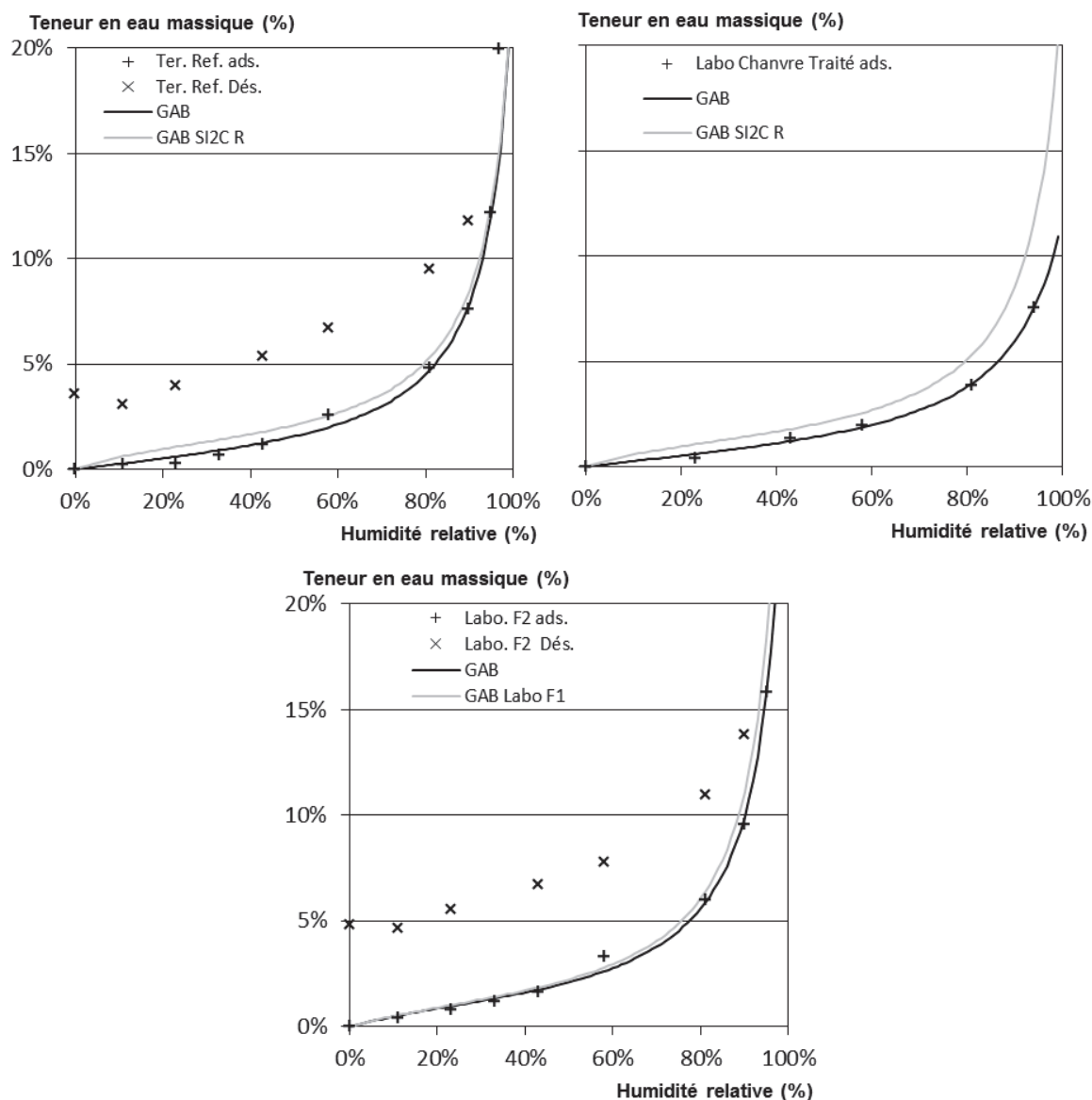


Figure 4.42 Isotherme de sorption des formulations Variante « Type de Chanvre »

Points expérimentaux et modèle GAB

Haut Gauche : Terrachanvre Référence – Haut Droite : Béton de chanvre Traité / Bas : Labo F2

Modèle	GAB			
Paramètre	wm	C	K	R ²
SI2C Référence	0,013	6,560	0,946	0,999
Terrachanvre Référence	0,012	2,262	0,950	0,998
Béton de Chanvre traité	0,012	2,511	0,903	0,999
Labo F1	0,014	4,074	0,971	0,997
Labo F2	0,014	4,157	0,963	0,998

Tableau 4.26 Paramètres du modèle GAB – Variante « Type de Chanvre »

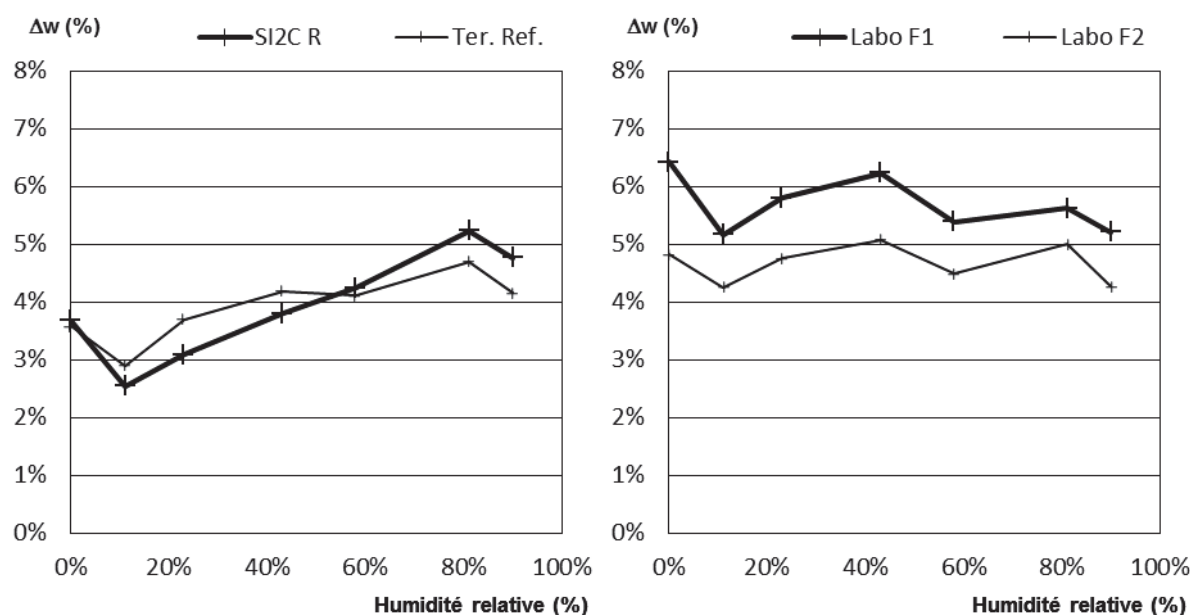


Figure 4.43 Isotherme de sorption des formulations Variante « Type de Chanvre »
Evolution de l'hystérésis sur le domaine d'humidité relative

b. Transfert : Perméabilité à la vapeur et diffusivité hydrique

La perméabilité à la vapeur du béton de chanvre avec du chanvre traité a été mesurée uniquement pour le point normatif (0 ; 50). Cette valeur ($2,68 \cdot 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$) est très légèrement inférieure à celle de la formulation de référence SI2C-R ($2,92 \cdot 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$).

Pour les formulations avec du chanvre fibré, l'évolution de la perméabilité à la vapeur avec l'hygrométrie est donnée Figure 4.44 et Tableau 4.27, celle de la diffusivité hydrique avec la teneur en eau Figure 4.45.

Dans les deux cas (formulation Terrachanvre référence et laboratoire F2), le béton de chanvre fibré donne une courbe de même allure que la formulation de référence associée. Pour les faibles et moyennes hygrométries, le chanvre Terrachanvre conduit à des perméabilités à la vapeur légèrement plus fortes alors qu'aux hygrométries les plus importantes, il conduit à des perméabilités plus faibles. La diffusivité hydrique des formulations avec du chanvre fibré présente une valeur maximale pour des teneurs en

eau plus faibles que celle des formulations de référence associées. Il est probable que la présence des fibres favorise l'apparition de la continuité liquide aux faibles hygrométries mais constitue un obstacle aux hygrométries les plus importantes.

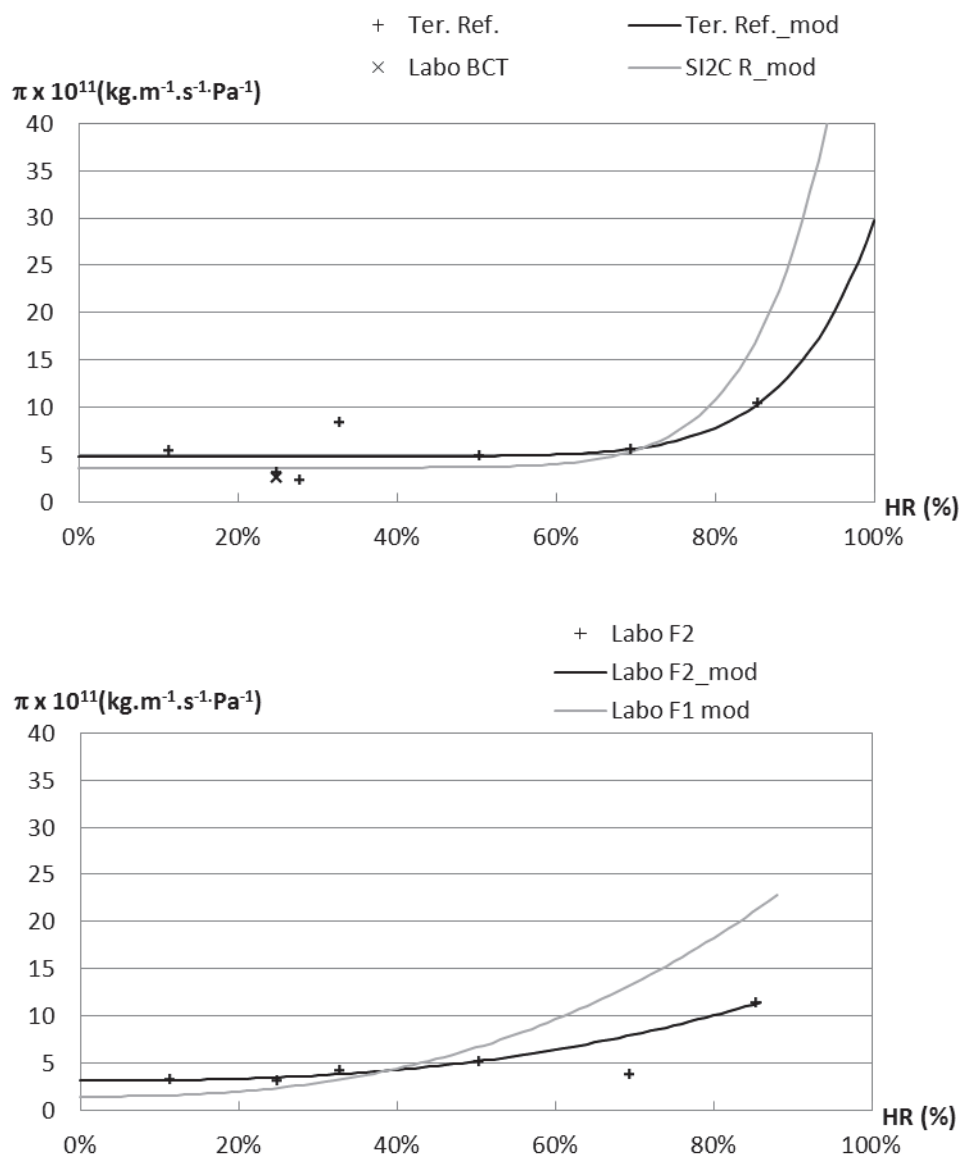


Figure 4.44 Perméabilité à la vapeur et modèle – Variante « Type de Chanvre »

Formulation	$A \times 10^{11}$	$B \times 10^{11}$	C
SI2C Référence	3.104	52.775	8.479
SI2C Référence Terrachanvre	4.803	24.892	9.473
Laboratoire F1	1.442	29.410	2.505
Laboratoire F2	3.123	12.317	2.585

Tableau 4.27 Paramètres du modèle de perméabilité à la vapeur – Variante « Type de Chanvre »

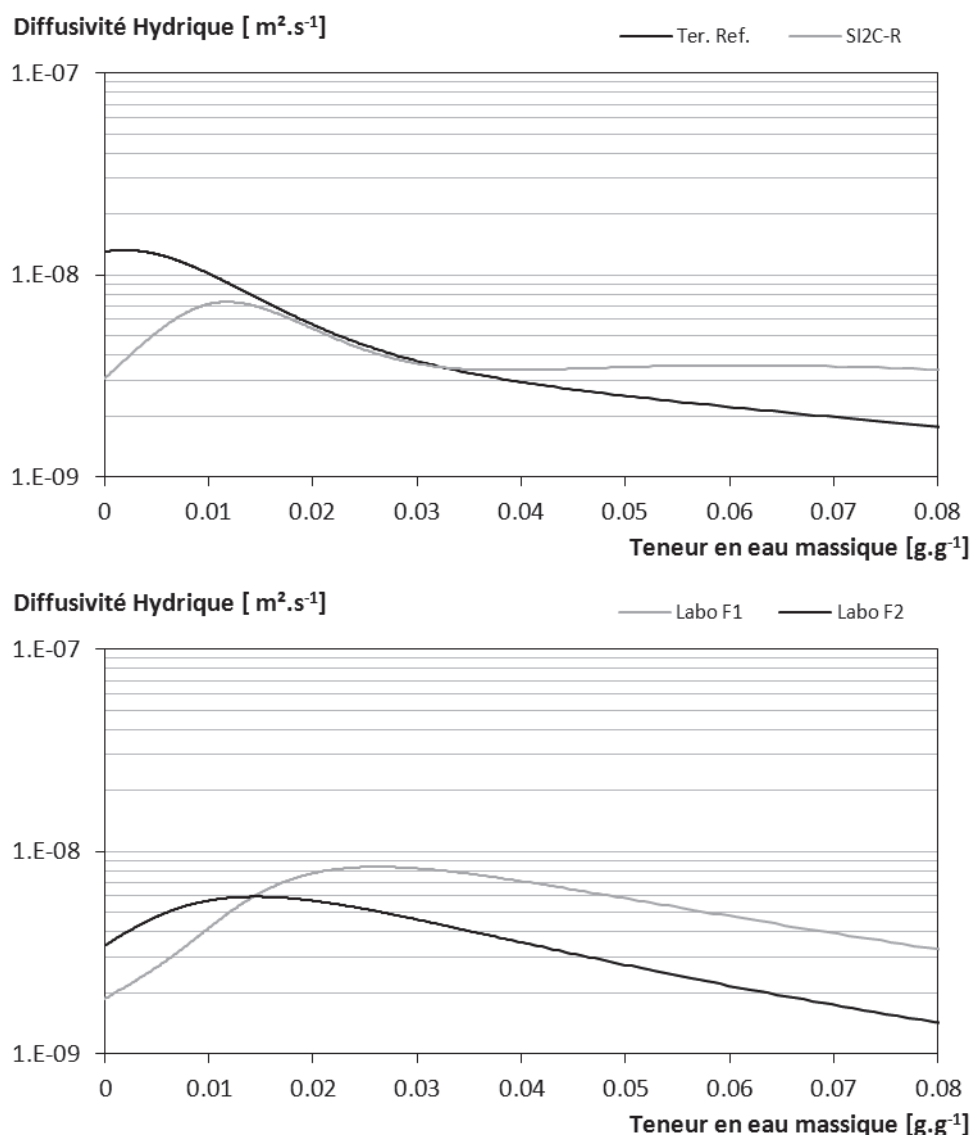


Figure 4.45 Diffusivité hydrique en fonction de la teneur en eau – Variante « Type de Chanvre »

4.6.3 Propriétés Mécaniques

L'ensemble des données expérimentales est donné en Annexe.

Les contraintes maximales de la formulation F2 sont inférieures à celles de la formulation F1 et de SI2C Référence (Tableau 4.28 et Figure 4.46). Sachant que la nature du liant, la proportion liant/Chanvre et la mise en œuvre sont identiques pour F1 et F2, nous pouvons en conclure que l'utilisation de chanvre fibré affecte la prise en résistance du liant. Ceci peut s'expliquer par :

- Une quantité d'eau de gâchage plus importante induite par le chanvre fibré qui entraîne une dilution plus importante du liant et conduit à une diminution de sa résistance à l'état durci (voir chapitre 1-1.3.5). Afin de travailler à masse volumique finale constante, l'augmentation du dosage en eau s'accompagne d'une augmentation du volume d'air occlus à la mise en œuvre.

- Une réaction chimique entre certains composés solubles de la chènevotte et le liant, ce qui pénalise le durcissement. De tels phénomènes sont connus mais le fait qu'ils soient plus présents pour du chanvre fibré resterait à confirmer.

	ρ (kg.m ⁻³)	E_{apparent} (MPa)	$E_{\text{élastique}}$ (MPa)	σ_{max} (MPa)	$\varepsilon_{\sigma\text{max}}$ (mm/mm)	$\sigma_{\varepsilon 15\%}$ (MPa)
Formulation 1	427,27	88,43	134,92	0,73	0,02	0,21
Formulation 2	469,17	34,48	66,58	0,44	0,02	0,15

Tableau 4.28 résultats expérimentaux

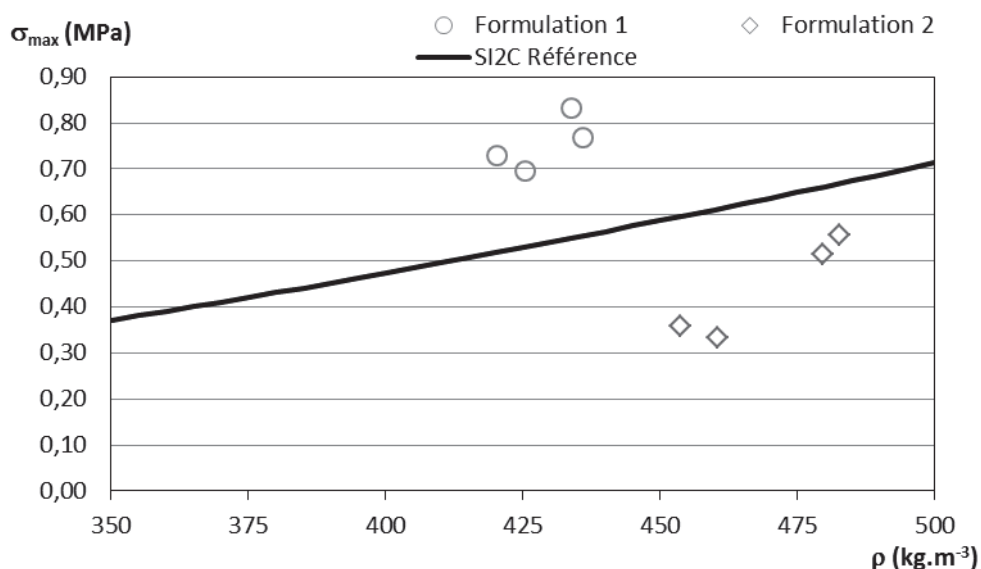


Figure 4.46 Contrainte maximale en fonction de la masse volumique apparente

Les modules de Young obtenus pour la formulation 2 sont environ deux fois plus faibles que ceux obtenus pour la formulation 1 (respectivement 34 et 88MPa pour le module Apparent et 67 et 135MPa pour le module Elastique). L'utilisation du chanvre fibré conduit à un béton de chanvre plus souple qu'avec du chanvre défibré.

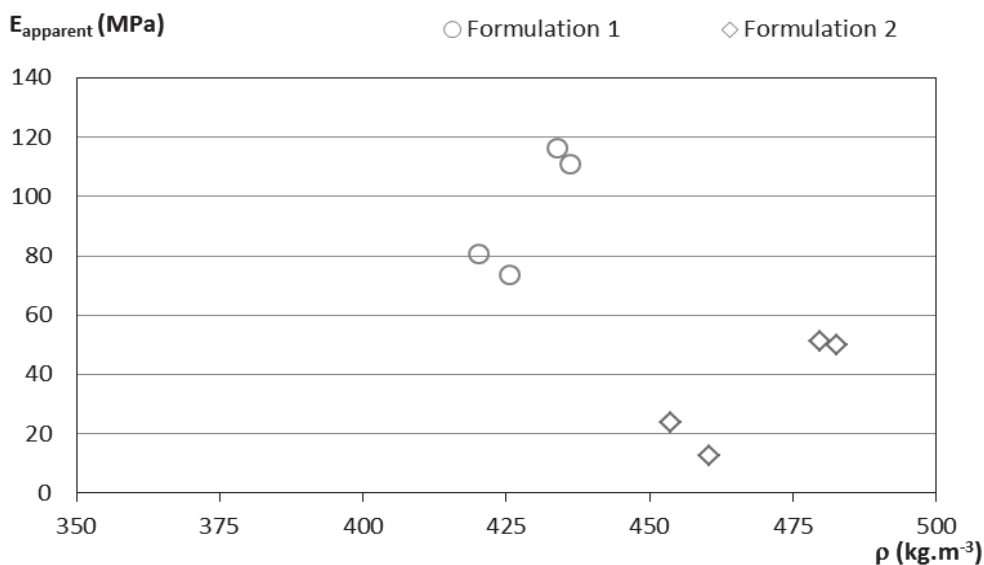


Figure 4.47 Module de Young Apparent en fonction de la masse volumique

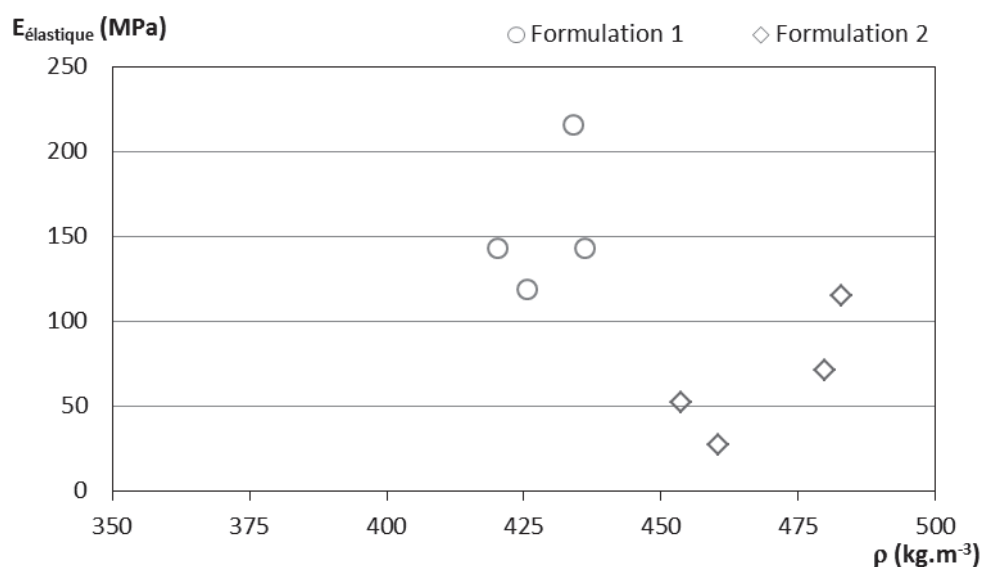


Figure 4.48 Module de Young Elastique en fonction de la masse volumique

La contrainte résiduelle pour une déformation de 15% est également plus faible pour la formulation 2 que pour la formulation 1 (respectivement 0.15 et 0.21MPa).

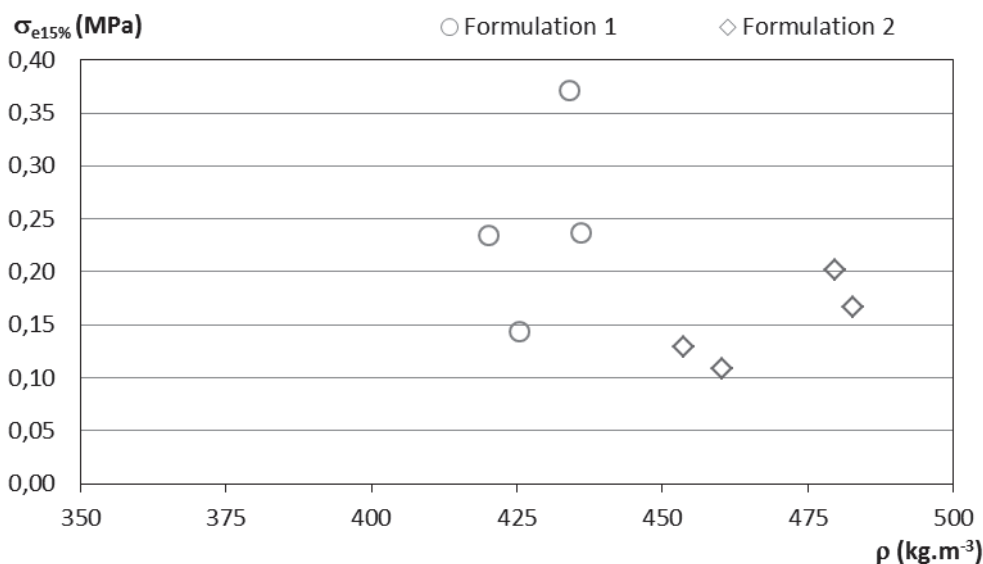


Figure 4.49 Contrainte à une déformation de 15% en fonction de la masse volumique

Au bilan, l'utilisation de chanvre fibré dans le béton de chanvre augmente la masse volumique apparente et dégrade sensiblement l'ensemble des caractéristiques mécaniques en compression. Les fibres pourraient apporter un intérêt pour le comportement en traction mais celui-ci n'a pas été étudié.

4.7 Formulations de types « Liants et enduits »

Deux types de liants sont considérés : le Tradical PF70 utilisé dans les bétons de chanvre et le tradichanvre utilisé dans les enduits. L'enduit chanvribat et l'enduit Terrachanvre ont les mêmes dosages liant/chanvre, le premier est composé de chanvre chanvribat et le second de chanvre Terrachanvre fin.

4.7.1 Séchage et Propriétés physiques

L'étude du séchage n'est pas réalisée sur les liants car il n'y a pas eu de blocs réalisés, les échantillons de liant étant réalisés directement à la dimension souhaitée pour les différents essais.

Les liants purs ont des masses volumiques apparentes élevées (1031 kg.m^{-3} pour le Tradical PF70 et 1260 kg.m^{-3} pour le Tradichanvre). Leurs masses volumiques réelles présentent un écart inférieur à 5%, elles sont de 2566 et 2688 kg.m^{-3} . Le Tradical PF70 a une porosité exclusivement ouverte, de l'ordre de 60%. Le Tradichanvre présente une porosité plus faible que le Tradical PF70, essentiellement ouverte (51,5 % pour une porosité totale de 53,1%).

L'épaisseur des blocs d'enduit avec du chanvre chanvribat est de 17 cm, celle des blocs d'enduit avec du chanvre Terrachanvre est de 12 cm. Les durées de séchage respectives sont de 62 et 55 jours. Ces durées sont plus longues que celles du béton de chanvre du fait de masses volumiques plus élevées. Les pertes de masse sont de 30 et 31%, comparables à celles des bétons de chanvre (autour de 28%).

La masse volumique apparente de l'enduit chanvribat est inférieure à celle de l'enduit Terrachanvre du fait d'une porosité plus élevée (resp. 723 et 881 kg.m^{-3}). En effet, leur masse volumique réelle est comparable en lien avec leur composition. Les porosités ouvertes sont proches (autour de 65%), l'écart se situe surtout au niveau des porosités totales (resp. 72 et 66%), et donc de la porosité fermée.

Formulation	$\rho_{\text{app moy}} [\text{kg.m}^{-3}]$	Ecart-type	nb blocs
Enduit Chanvribat	723,0	8,8	7
Enduit Terrachanvre	880,9	16,5	7
Liant - Tradical PF70	1030,9	14,9	8
Liant - Tradichanvre	1259,8	23,4	17

Tableau 4.29 Masse volumique apparentes des blocs – Enduits et liants

	n_0	$\rho_{\text{reel}} [\text{kg.m}^{-3}]$	n
Enduit Chanvribat	65.5%	2585.87	72.0%
Enduit Terrachanvre	64.2%	2580.59	65.9%
Liant - Tradical PF70	59.6%	2566.00	59.8%
Liant - Tradichanvre	51.5%	2688.00	53.1%

Tableau 4.30 Autres caractéristiques physiques - Enduits et liants

4.7.2 Propriétés hydriques

a. Stockage : Isothermes de sorption

Les Figure 4.50 et Figure 4.51 présentent respectivement les isothermes de sorption avec des teneurs en eau massiques et volumiques.

Le Tradical PF70 présente une isotherme expérimentale à deux paliers : un aux faibles et un aux moyennes hygrométries. Habituellement, les isothermes à paliers témoignent de l'empilement de couches successives et sont obtenues sur des matériaux non poreux. A l'issue du premier palier (autour de 35%HR), la teneur en eau massique est de 1,10%. La teneur en eau continue ensuite d'évoluer pour atteindre 10,15% à 97%HR. Cette allure n'est pas modélisable avec le modèle GAB, toutefois celui-ci donne une allure globale satisfaisante. Aux faibles hygrométries, les teneurs en eau massiques sont comparables à celles du béton de chanvre. Toutefois, étant données les masses volumiques, les teneurs en eau volumiques sont plus importantes pour le liant seul. A partir des hygrométries moyennes (autour de 50%), la condensation capillaire se produit progressivement dans le liant alors qu'elle se produit de façon plus brusque autour de 70%HR dans le béton de chanvre. L'ajout de chènevotte dans le béton de chanvre conduit donc à une réduction de la capacité de stockage du matériau.

L'isotherme de sorption obtenue pour le liant Tradichanvre présente des teneurs en eau beaucoup plus faibles que celles obtenues pour le liant Tradical PF70. A 58% HR, la teneur en eau est de 0,4% pour le Tradichanvre alors qu'elle est de 1,5% pour le Tradical PF70. Aux faibles et moyennes hygrométries, la teneur en eau évolue très peu en lien avec une teneur en eau monomoléculaire très faible et une apparition tardive de la condensation capillaire.

Les isothermes de sorption obtenues pour les deux types d'enduit sont semblables. Elles sont de type II. Les teneurs en eau massiques sont supérieures à celles obtenues pour le liant Tradichanvre par contre elles sont inférieures à celles obtenues pour les bétons de chanvre. A 58%, elles sont respectivement de l'ordre de 1,2%, 0.4% et 3%. Par contre, lorsque les teneurs en eau sont exprimées en volumique, les isothermes de sorption obtenues pour les enduits sont similaires à celles obtenues pour le béton de chanvre, les capacités de stockage dans un volume donné sont donc les mêmes pour les enduits et le béton de chanvre.

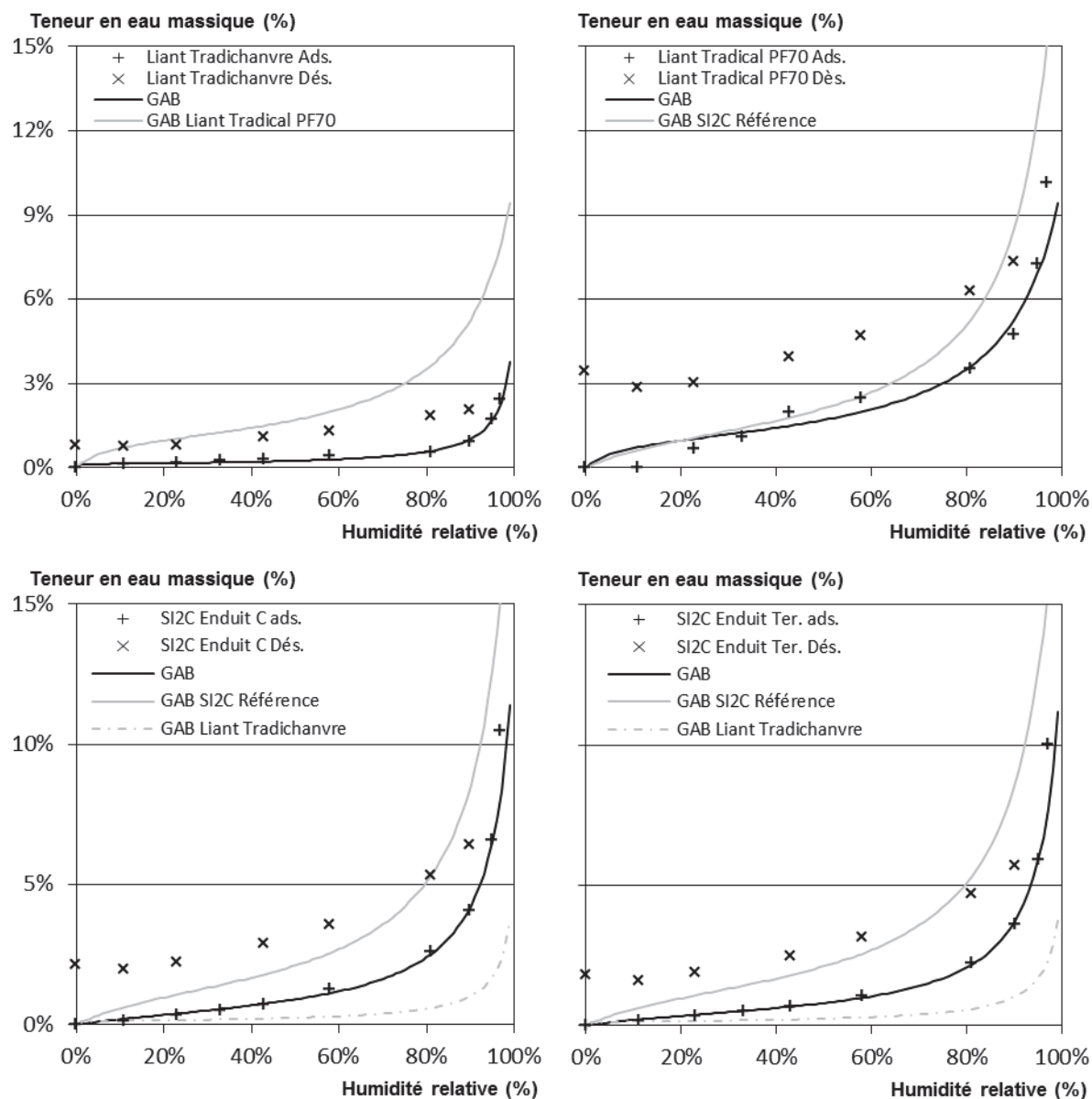


Figure 4.50 Isotherme d'adsorption-désorption massique
Haut Gauche : Liant Tradichanvre / Droite : Liant Tradical PF70
Bas Gauche : Enduit Chanvribat / Droite : SI2C Enduit Terrachanvre

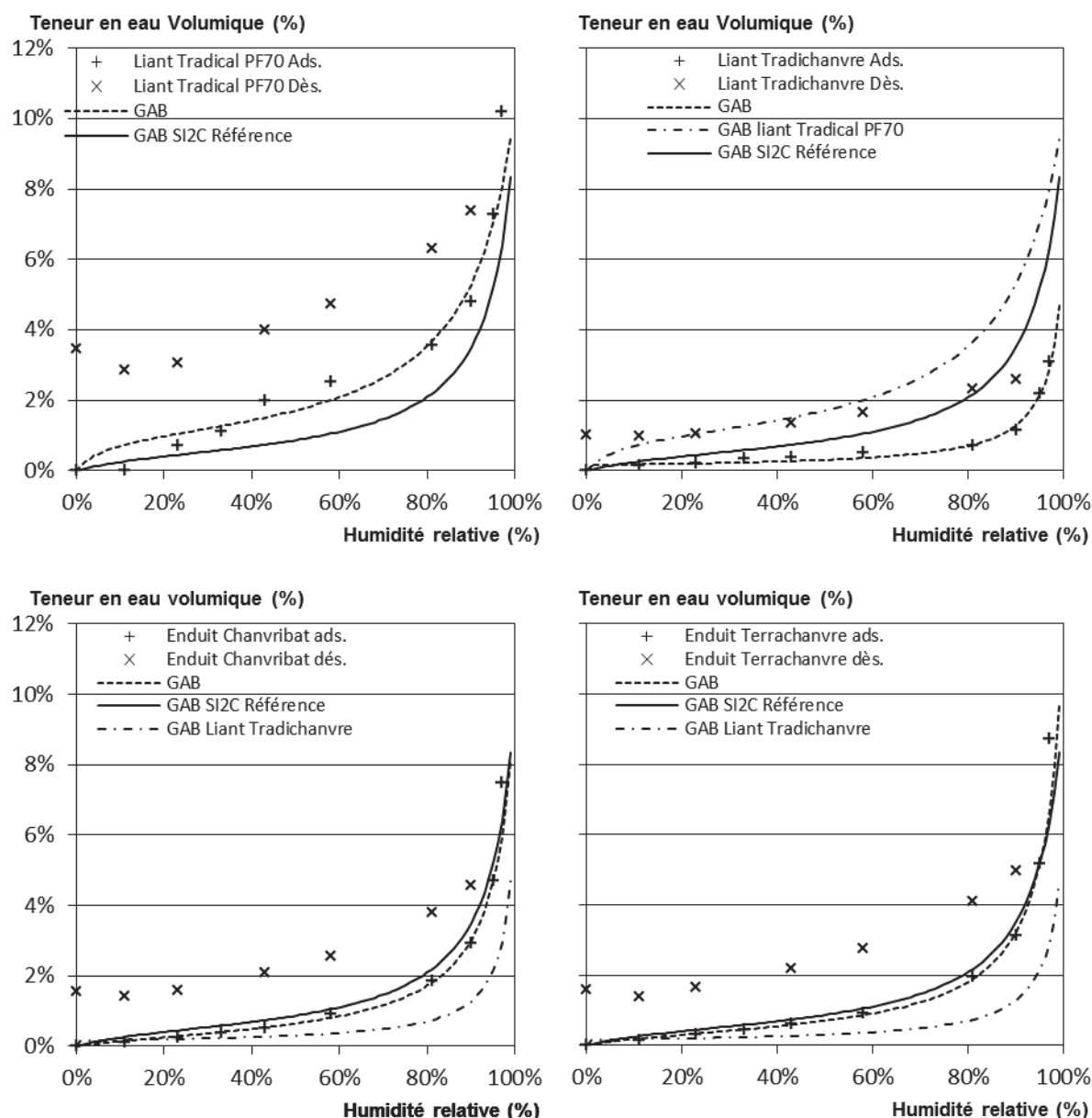


Figure 4.51 Isotherme d'adsorption-désorption Volumique
Haut Gauche : Liant Tradichanvre / Droite : Liant Tradical PF70
Bas Gauche : Enduit Chanvribat / Droite : SI2C Enduit Terrachanvre

Modèle	GAB			
Paramètre	wm	C	K	R ²
SI2C Référence	0,013	6,560	0,946	0,999
Liant Tradical PF70	0,010	17,230	0,904	0,988
Liant Tradichanvre	0,001	279507,936	0,977	0,992
Enduit Chanvribat	0,006	3,546	0,957	0,999
Enduit Terrachanvre	0,005	5,129	0,965	1,000

Tableau 4.31 Paramètres du modèle GAB – Enduits et liants

Les hystérésis obtenues pour les liants et les enduits présentent des évolutions similaires avec une valeur maximale à 81%HR. Toutefois, à 0%HR l'hystérésis du Tradical PF70 a une valeur supérieure à celle à 43%. Si l'hystérésis était liée uniquement au comportement hydrique du matériau, elle devrait être égale ou inférieure. Cela souligne donc l'existence d'autres phénomènes tels que la carbonatation.

Globalement, le Tradichanvre présente l'hystérésis la plus faible (autour de 1%). Les enduits ont des valeurs comparables entre 1,4 et 2,7 % sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie. Le liant Tradical PF70 a des valeurs similaires à celles des enduits au-delà de 40%HR. L'ensemble de ces hystérésis est inférieur à celle rencontrée pour le béton de chanvre. L'écart est d'autant plus important que les hygrométries sont élevées. La présence d'hystérésis dans le béton de chanvre est donc attribuable en partie à la présence de chènevottes.

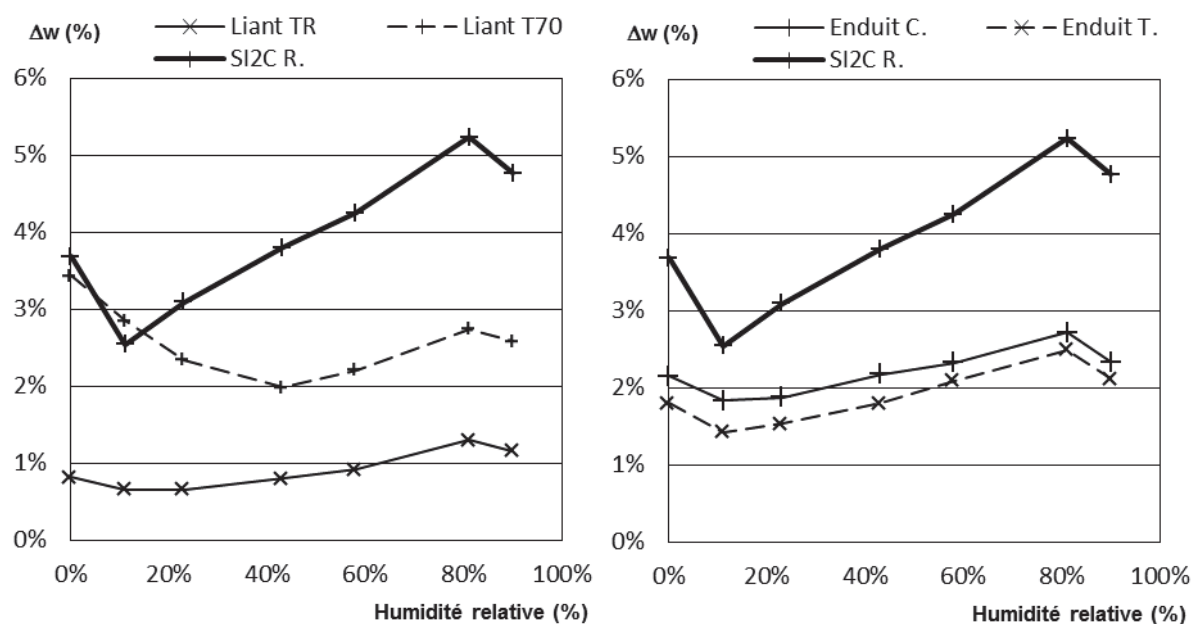


Figure 4.52 Isotherme de sorption des formulations « Liants et Enduits »
Evolution de l'hystérésis sur le domaine d'humidité relative

b. Transfert : Perméabilité à la vapeur et diffusivité hydrique

La Figure 4.53 présente l'évolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de l'humidité relative et le Tableau 4.32 donne les paramètres de l'ajustement avec la loi puissance.

Le Tradical PF70 et le Tradichanvre présentent des perméabilités à la vapeur similaires sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie. Aux faibles et moyennes hygrométries (jusqu'à 60 %HR), la perméabilité à la vapeur est constante, de l'ordre de $2,5$ à $2,7 \cdot 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$. Aux humidités plus élevées, la perméabilité à la vapeur augmente pour atteindre $5 \cdot 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ au point 81/90% HR. La perméabilité à la vapeur du liant pur (Tradical PF70) est inférieure à celle du béton de chanvre sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie. L'ajout de chanvre conduit donc une taille de pores plus grande (porosité interparticulaire et canaux dans les chènevottes) ce qui

induit une perméabilité plus importante du matériau. Aux hygrométries les plus élevées, l'évolution de la perméabilité à la vapeur est beaucoup plus marquée pour le béton de chanvre que pour le liant pur. Le chanvre permet donc également une meilleure efficacité des transferts sous forme liquide, au sein des capillaires du chanvre. L'évolution de la diffusivité hydrique du liant Tradical PF70 a une allure comparable à celle du béton de chanvre de référence, toutefois la valeur maximale atteinte est plus faible pour le liant pur ($3,4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ vs $7,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Le chanvre favorise donc la diffusion de l'humidité dans le matériau. Le liant Tradichanvre présente une valeur maximale de diffusivité hydrique de $4,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour une teneur en eau très faible ($0,001 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$), en lien avec la teneur en eau monomoléculaire. Après le pic, la diffusivité hydrique décroît très rapidement.

L'enduit chanvribat et l'enduit Terrachanvre présentent tous deux une évolution progressive de la perméabilité à la vapeur tout au long du domaine d'hygrométrie. Toutefois, la perméabilité à la vapeur de l'enduit Terrachanvre est plus faible que celle de l'enduit Chanvribat sur l'ensemble du domaine. Elles évoluent respectivement de $1,6 \cdot 10^{-11}$ à $5 \cdot 10^{-11}$ et de $2,8 \cdot 10^{-11}$ à $6,5 \cdot 10^{-11} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$. Les chènevottes Terrachanvre étant plus petites que les chènevottes chanvribat, la taille des canaux au sein des chènevottes est plus faible, ce qui apporte une plus grande résistance au passage de la vapeur dans le matériau. La diffusivité hydrique maximale des enduits est du même ordre de grandeur que celle du béton de chanvre. Elle est atteinte pour des teneurs en eau de l'ordre de $0,005 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$. Au-delà, la diffusivité hydrique diminue plus fortement dans les enduits que dans le béton de chanvre.

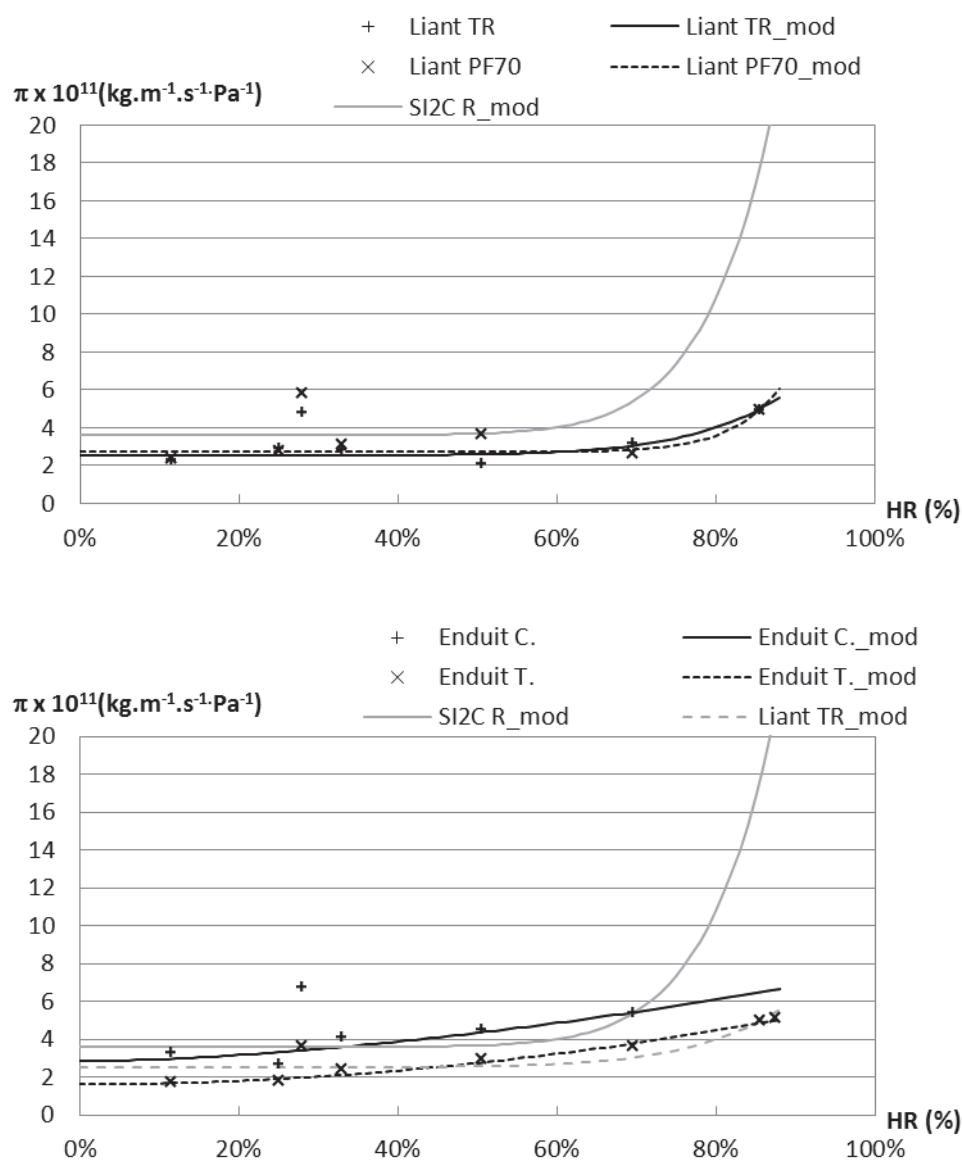


Figure 4.53 Perméabilité à la vapeur- Liants et enduits

Formulation	$A \times 10^{11}$	$B \times 10^{11}$	C
SI2C Référence	3.104	52.775	8.479
SI2C Enduit	2.847	4.714	1.655
SI2C Enduit Terrachanvre	1.626	4.430	1.971
Liant Tradical PF70	2.704	20.000	14.021
Liant Tradichanvre	2.537	8.001	7.604

Tableau 4.32 Paramètres du modèle de perméabilité à la vapeur – Liants et enduits

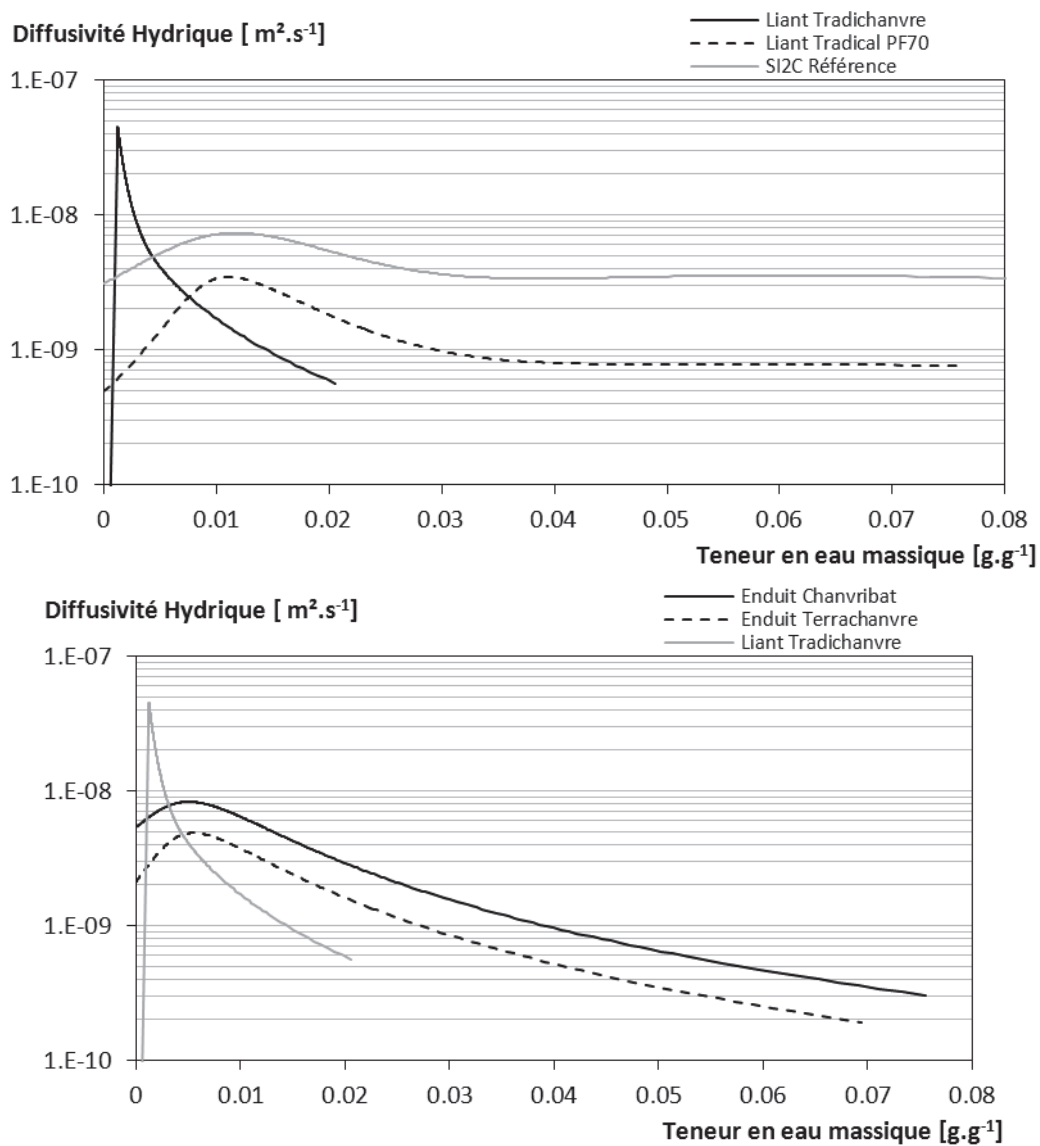


Figure 4.54 Diffusivité hydrique en fonction de la teneur en eau – Liants et enduits

4.8 Durabilité des bétons de chanvre

4.8.1 Propriétés physiques

La masse volumique apparente des formulations carbonatées est similaire à celle des formulations non carbonatées (écart maximum de 2%). La carbonatation n'influence donc pas notablement la masse volumique des matériaux étudiés. Les effets observés sur les propriétés hydriques et mécaniques ne seront donc pas à associer à un effet de masse volumique.

Formulation	Non carbonatée	Carbonatée
Laboratoire F1	428.9	419.8
Laboratoire F2	469.2	475.7
Laboratoire F3	415.3	420.5
Laboratoire F4	409.9	406.4

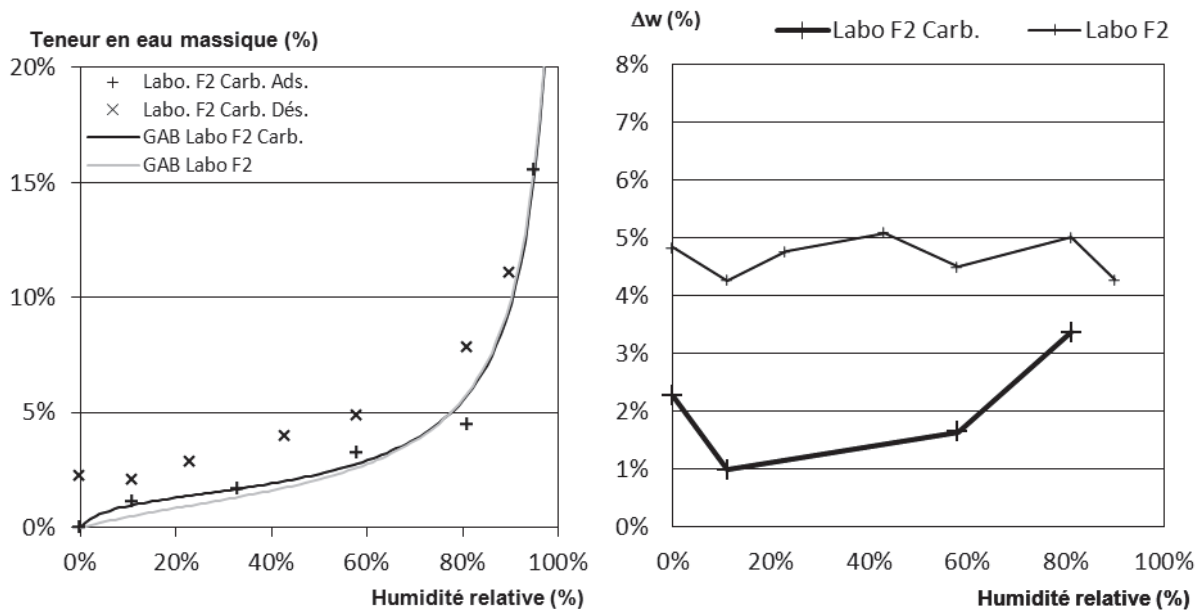
Tableau 4.33 Masse volumique apparentes des échantillons [kg.m^{-3}]-Formulations Labo carbonatées et non carbonatées

4.8.2 Propriétés hydriques

a. Stockage : Isothermes de sorption

L'isotherme de sorption obtenue pour la formulation laboratoire F2 carbonatée est une sigmoïde de type II, comparable à celle obtenue pour la formulation laboratoire F2 en adsorption (Figure 4.54). Le modèle GAB donne une teneur en eau monomoléculaire comparable pour les formulations carbonatée et non carbonatée. Cette teneur en eau est atteinte pour une hygrométrie de 20%. Le nez est bien visible ce qui indique que la première couche est bien développée avant la mise en place des couches suivantes. De plus, la chaleur de liaison entre la première couche et la surface du matériau est plus élevée que pour la formulation non carbonatée. La carbonatation induit une modification morphologique et chimique qui se répercute principalement sur le développement de la première couche et impacte peu les couches suivantes.

La formulation laboratoire F2 carbonatée présente également une hystérésis de sorption, comprise entre 1 et 3,4 %. Le maximum de l'hystérésis est observé pour une hygrométrie de 81%, en lien avec la condensation capillaire. Cette hystérésis est toutefois plus faible que celle de la formulation non carbonatée sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie. En effet, une part de l'hystérésis de la formulation non carbonatée peut être attribuée à la carbonatation du matériau au cours de l'essai.



Modèle	GAB			
Paramètre	wm	C	K	R ²
Labo F2	0.014	4.157	0.963	0.998
Labo F2 Carbonatée	0.013	19.087	0.966	0.994

Tableau 4.34 Paramètres du modèle GAB – Labo F2 carbonatée et non carbonatée

b. Transfert : Perméabilité à la vapeur et diffusivité hydrique

Aux faibles hygrométries (jusqu'à 25%HR), la formulation carbonatée conduit à des perméabilités plus faibles que la formulation non carbonatée. La carbonatation induit un réseau plus tortueux qui limite le transfert sous forme vapeur.

Pour des hygrométries plus élevées, la perméabilité à la vapeur est plus forte pour la formulation carbonatée que pour la formulation non carbonatée. L'évolution de la perméabilité avec l'hygrométrie est fortement augmentée par la carbonatation. La perméabilité à la vapeur obtenue pour la formulation carbonatée est comparable à celle de la formulation F3.

Enfin, la diffusivité hydrique de la formulation F2 carbonatée est inférieure à celle de la formulation non carbonatée pour les teneurs en eau inférieures à 0,013 g.g⁻¹ (correspondant à 20%HR). Au-delà, la formulation carbonatée montre une diffusivité hydrique supérieure à celle de la formulation non carbonatée. La valeur maximale (1,34.10⁻⁸ m².s⁻¹ pour w=0,025 g.g⁻¹) atteinte est alors comparable, elle aussi, à celle de la formulation F3.

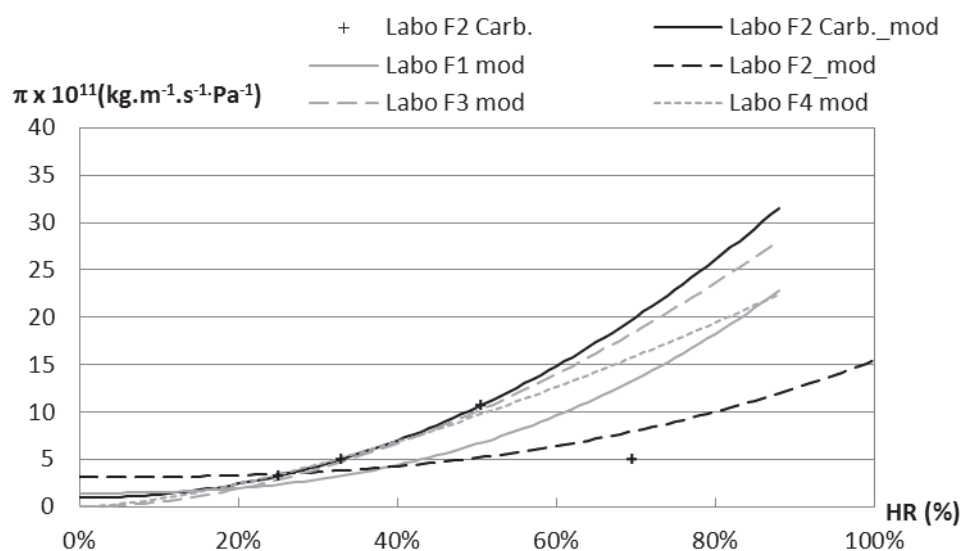


Figure 4.56 Perméabilité à la vapeur - Formulations Labo F2 carbonatée et F1, F2, F3 et F4 non carbonatées.

Formulation	$A \times 10^{11}$	$B \times 10^{11}$	C
Laboratoire 2	3.123	12.317	2.585
Laboratoire 2 Carbonaté	0.969	39.715	2.057

Tableau 4.35 Paramètres du modèle de perméabilité à la vapeur – Formulations Labo F2 carbonatée et non carbonatée

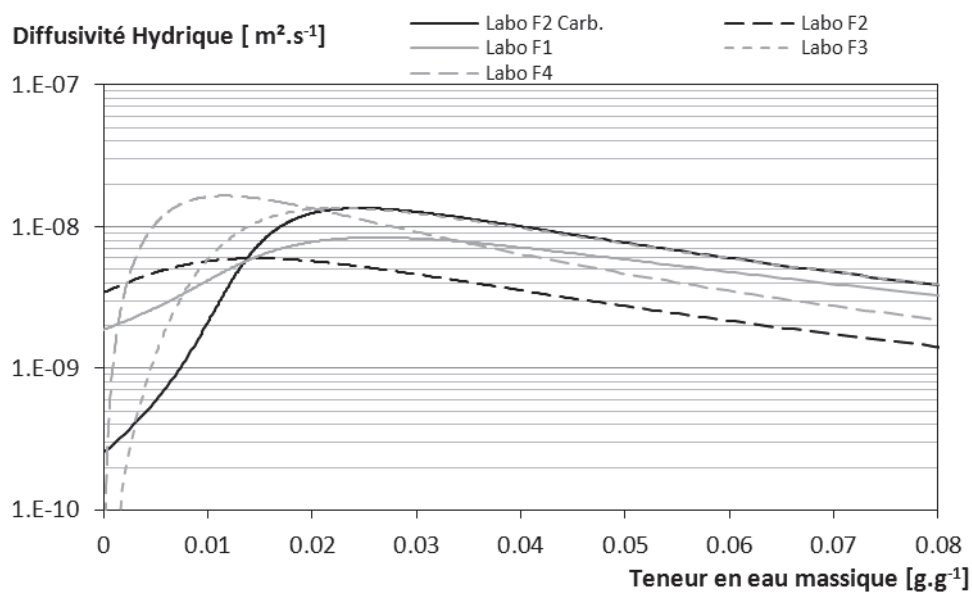


Figure 4.57 Diffusivité hydrique - Formulation Labo F2 carbonatée et Formulations F1, F2, F3 et F4 non carbonatées.

4.8.3 Propriétés mécaniques

Le détail des résultats obtenus sur des échantillons des formulations laboratoire (F1 à F4) soumis à la carbonatation est donné en Annexe.

La carbonatation n'a pas d'impacts majeurs sur la résistance à la rupture des bétons de chanvre (synthèse des résultats présentée dans le Tableau 4.36). De plus, la déformation à la rupture reste globalement identique pour l'ensemble des formulations : 0,02 mm/mm.

	ρ (kg.m ⁻³)	E_{apparent} (MPa)	$E_{\text{élastique}}$ (MPa)	σ_{max} (MPa)	$\varepsilon_{\sigma_{\text{max}}}$ (mm/mm)	$\sigma_{\varepsilon 15\%}$ (MPa)
F1 Carbonaté	419,83	73,34	125,74	0,62	0,02	0,15
F1 Non Carbonaté	428,94	95,39	155,07	0,76	0,02	0,25
F2 Carbonaté	475,66	42,89	92,85	0,49	0,02	0,19
F2 Non Carbonaté	469,17	34,48	66,58	0,44	0,02	0,15
F3 Carbonaté	420,46	64,44	86,67	0,66	0,01	0,10
F3 Non Carbonaté	415,31	71,58	114,60	0,62	0,02	0,10
F4 Carbonaté	406,43	85,95	128,13	0,57	0,01	0,11
F4 Non Carbonaté	409,87	59,22	98,41	0,56	0,02	0,15

Tableau 4.36 Masse volumique apparente, Module de Young (Apparent et élastique) et Contraintes (Maximale et résiduelle) des différentes formulations

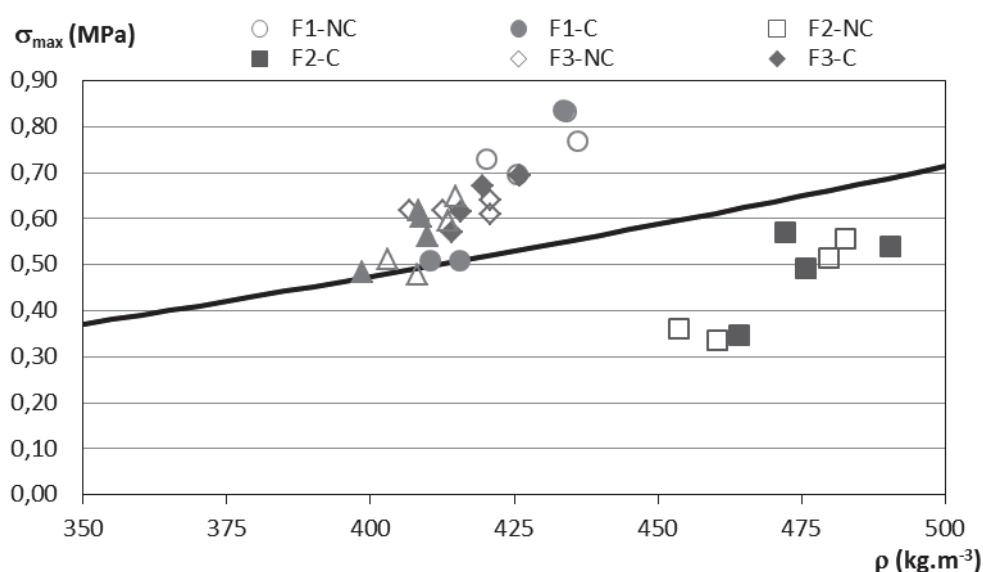


Figure 4.58 Contrainte maximale en fonction de la masse volumique apparente

La carbonatation ne joue pas de rôle sur la rigidité du matériau, que ce soit lors du chargement principal ou lors d'un rechargement (Figure 4.59 et Figure 4.60).

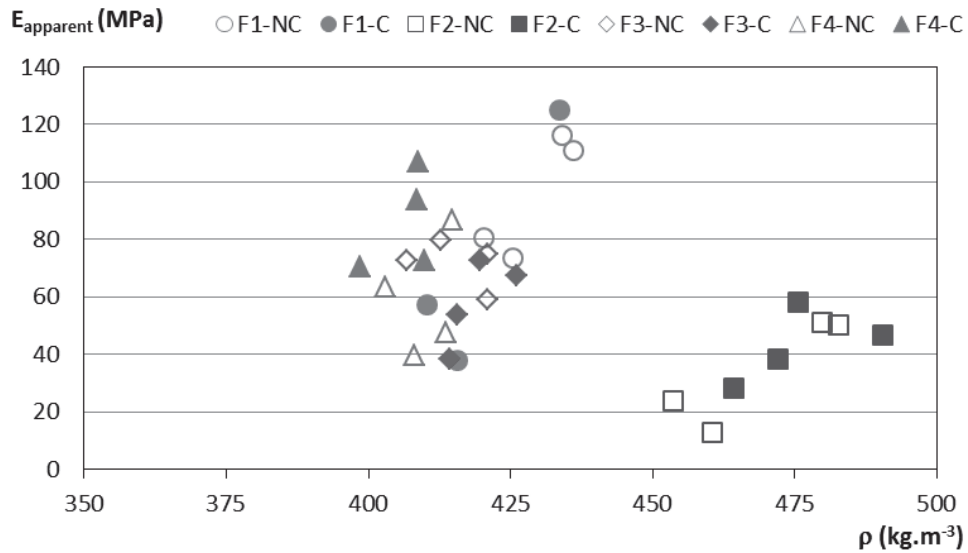


Figure 4.59 Module de Young Apparent en fonction de la masse volumique

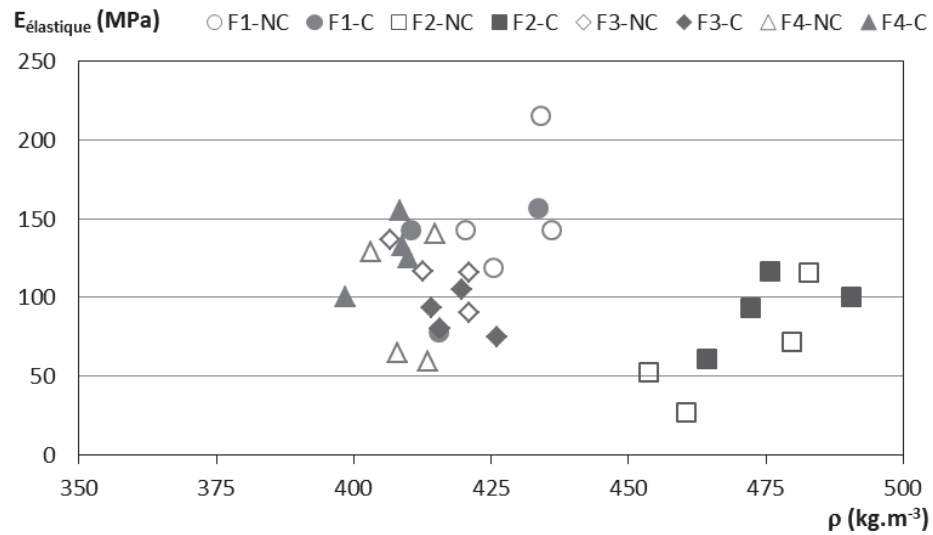


Figure 4.60 Module de Young Elastique en fonction de la masse volumique

Comme le montre la Figure 4.61, la carbonatation diminue légèrement la contrainte résiduelle à une déformation de 15% du béton de chanvre non fibré : la ductilité du matériau est donc modifiée. Ceci est d'autant plus notable pour F1 qui présente la proportion en chaux la plus élevée.

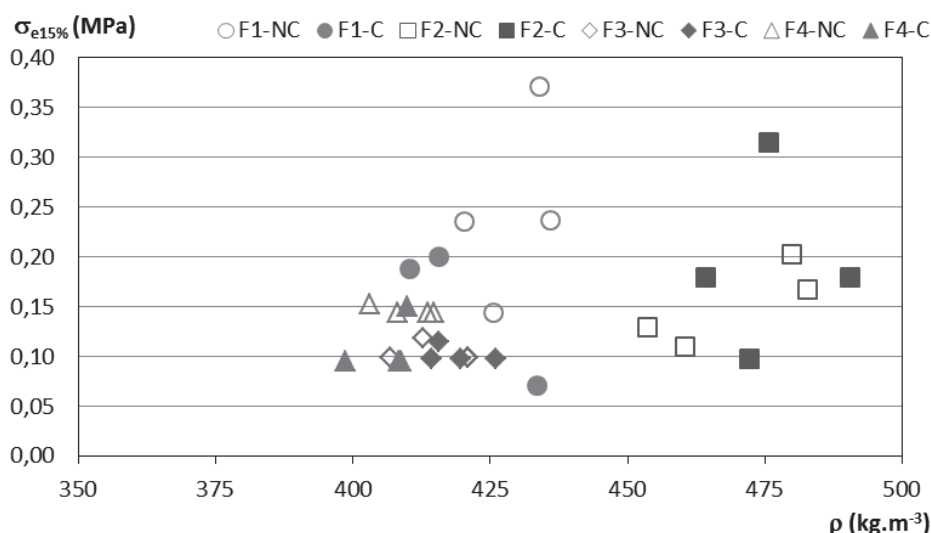


Figure 4.61 Contrainte à une déformation de 15% en fonction de la masse volumique

Les données précédentes permettent d'analyser d'éventuels couplages entre paramètres caractéristiques mécaniques. Ainsi, la Figure 4.62 présente l'évolution de la contrainte maximale σ_{\max} en fonction du module apparent. Il apparaît que la contrainte maximale évolue linéairement en fonction du module apparent, ce quel que soit la nature du liant ou le type de chènevotte. La relation entre la contrainte maximale et le module élastique est moins directe (Figure 4.63). L'ensemble des modules élastiques présente un nuage de point plus dispersé. La régression linéaire présente un coefficient de corrélation de 0.513 (0.713 pour le module apparent).

Les droites de régressions correspondent à :

$$\sigma_{\max} = 0,0038 \cdot E_{\text{apparent}} + 0,3404 \quad (R^2 = 0.703)$$

$$\sigma_{\max} = 0,0023 \cdot E_{\text{élastique}} + 0,3386 \quad (R^2 = 0.513)$$

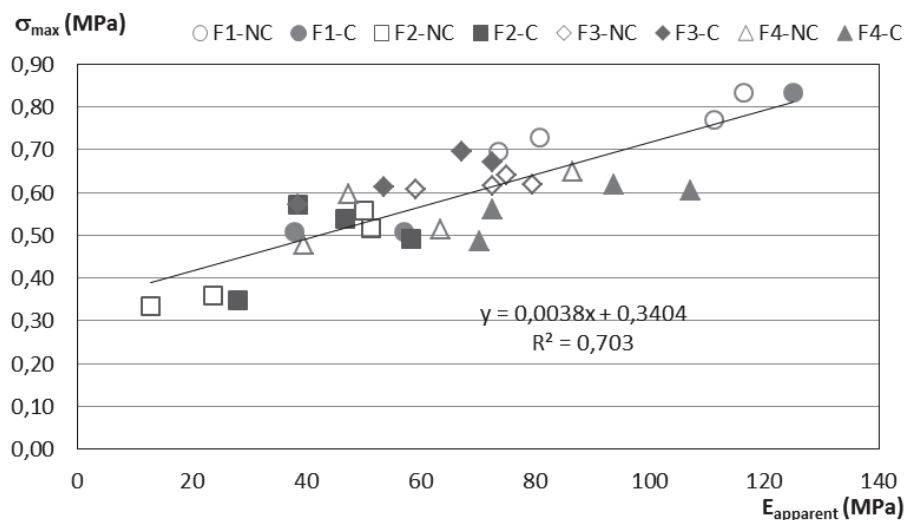


Figure 4.62 Contrainte maximale en fonction du module apparent

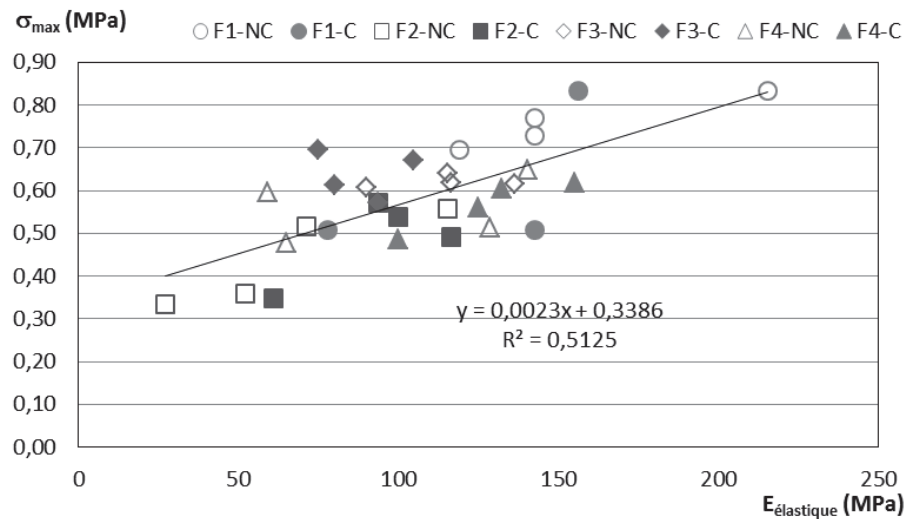


Figure 4.63 Contrainte maximale en fonction du module élastique

La Figure 4.64 présente la déformation correspondant à la contrainte maximale en fonction du module de Young Apparent. La carbonatation diminue légèrement cette déformation.

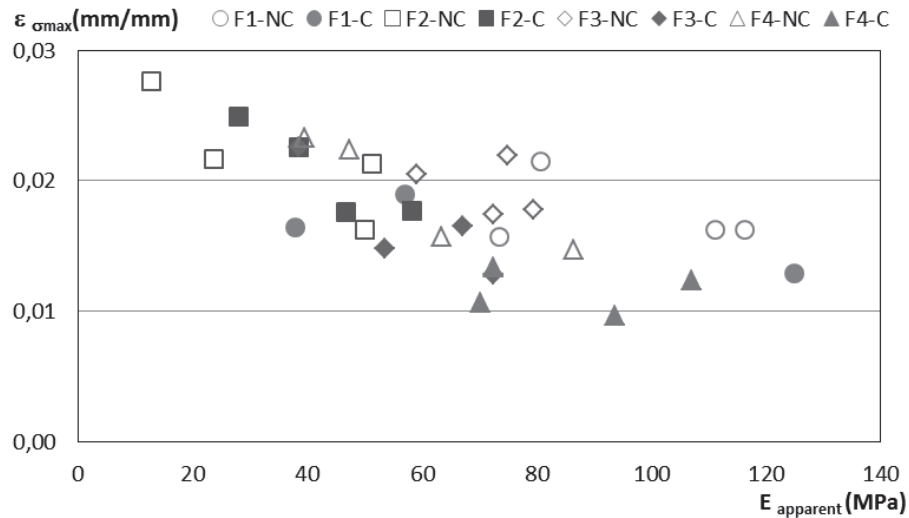


Figure 4.64 Déformation à la contrainte maximale en fonction du module de Young apparent

Conclusion

Cette étude a permis de satisfaire différents objectifs du projet ANR « BetonChanvre », à savoir :

- de caractériser les matériaux habituellement mis en œuvre par les partenaires industriels du projet,
- d'évaluer l'effet d'une modification des formulations visant à réduire le temps de séchage et à augmenter le durcissement au jeune âge sur les propriétés des bétons de chanvre,
- d'évaluer l'impact des modifications de composants sur les propriétés physiques, hydriques et mécaniques du béton de chanvre.

Les formulations de référence testées sont caractéristiques de différentes applications (mur, dalle, toit et enduit). Ces formulations diffèrent par le dosage en liant pour les formulations SI2C, le taux de compactage pour Easy-Chanvre et par le type de Chanvre pour Terrachanvre.

Pour ces formulations de référence, les caractéristiques principales identifiées sont :

- Les formulations Mur SI2C et Easy-Chanvre, utilisées comme références par la suite, ont des masses volumiques apparentes sensiblement égales (autour de 440 kg.m^{-3}).
- Les porosités ouvertes et totales de la formulation SI2C sont supérieures à celle de la formulation Easy-Chanvre.
- Les isothermes de sorption obtenues sont des sigmoïdes de type II ou III qui présentent une hystérésis sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie. La teneur en eau de la formulation SI2C est supérieure à celle de la formulation Easy-Chanvre pour les faibles et moyennes hygrométries (sorption mono puis polymoléculaire). Aux hygrométries les plus élevées, la teneur en eau de la formulation Easy-Chanvre devient supérieure à celle de la formulation SI2C (condensation capillaire).
- L'évolution de la perméabilité à la vapeur en fonction de l'hygrométrie a la même allure pour les deux formulations. Dans un premier temps, la perméabilité est constante (transfert sous forme vapeur uniquement), puis elle augmente avec la mise en place du transfert liquide. Le facteur de résistance à la vapeur d'eau pour le point sec (0 ; 50) est de 6,7.
- La résistance à la compression de la formulation SI2C est supérieure à celle de la formulation Easy-Chanvre (respectivement 0,5 et 0,3 MPa). Ces valeurs restent acceptables au regard des règles professionnelles de l'association Construire en Chanvre (supérieure à 0,2 MPa).

Sur la base des formulations de référence, différentes variantes ont été réalisées et caractérisées. Les résultats sont regroupés par type de modification.

Les variantes proposées par la société Easy-Chanvre : V1 et V2 diffèrent principalement par l'ajout de mélasse et de levure (pour V1) ainsi que par leur taux de compactage (pour V2). Ainsi, la variante V1 a une masse volumique apparente similaire à la formulation de référence et V2 a une masse volumique supérieure (resp. 466 et 550 kg.m^{-3}). Les principales conclusions identifiées pour ces deux variantes sont :

- La variante V2 présente une isotherme de sorption comparable à la formulation de référence alors que V1 montre une teneur en eau plus élevée.
- La perméabilité à la vapeur est équivalente pour les trois formulations pour des hygrométries inférieures à 80%.
- L'ajout de mélasse et de levure (V1) conduit donc à une porosité ouverte plus grande, permettant un stockage et un transfert plus important de l'humidité que pour la formulation de référence. Le compactage (V2) conduit à un réseau poreux moins favorable au stockage et au transfert d'humidité.

Les formulations mur, dalle et toit réalisées par projection par la société SI2C présentent des ratios liant/chènevotte différents (respectivement 2, 2.5 et 1), ce qui influe directement sur la masse volumique apparente. En toute logique, la formulation Dalle qui a le ratio de liant le plus important présente la masse volumique apparente la plus forte (460 kg.m^{-3}) ; réciproquement, la formulation toit, qui a le ratio le plus petit, a la masse volumique la plus faible (253 kg.m^{-3}). Les principales conclusions identifiées pour ces deux variantes sont :

- Les isothermes de sorption donnent des teneurs en eau massiques comparables pour les trois formulations aux faibles et moyennes hygrométries. Pour les hygrométries les plus élevées, la formulation toit a les teneurs en eau les plus fortes. L'étude en teneur en eau volumique montre qu'aux faibles et moyennes humidités relatives, où la fixation de l'humidité se fait par adsorption polymoléculaire, les teneurs en eau volumiques diminuent avec le dosage en chanvre. Ceci est corrélé avec le fait que la surface spécifique est principalement développée dans le liant. Aux plus fortes humidités, la condensation capillaire se produit dans les pores de petites tailles situés dans le liant et dans les parois des canaux des chènevottes. Ainsi on observe les valeurs les plus élevées pour le liant seul et pour les forts dosages en chanvre.
- La perméabilité à la vapeur de la formulation dalle est comparable à celle de la formulation mur jusqu'à 60%HR.

La caractérisation de deux liants couramment utilisés pour formuler des bétons de chanvre et des enduits permet d'identifier différents liens entre nature du liant et propriétés hydriques.

Le liant Tradical PF70 gâché à 0,60 et le liant Tradichanvre gâché à 0,42 ont des masses volumiques apparentes élevées (1030 et 1260 kg.m⁻³). Ces liants présentent une porosité majoritairement / exclusivement ouverte (de 52 à 60%). Sur le plan hydrique, les principales conclusions sont :

- Aux faibles et moyennes hygrométries le liant Tradical PF 70 présente des teneurs en eau massiques comparables à celles du béton de chanvre, et donc des teneurs en eau volumiques plus importantes. A partir des hygrométries moyennes (autour de 50%), la condensation capillaire se produit progressivement dans le liant alors qu'elle se produit de façon plus brusque, autour de 70%HR, dans le béton de chanvre. Le liant Tradichanvre, quant à lui, montre une isotherme de sorption plus faible que celle du liant Tradical PF70.
- Ces deux liants présentent des perméabilités à la vapeur comparables, plus faibles que celles obtenues pour du béton de chanvre, sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie. L'ajout de chanvre conduit donc à une meilleure efficacité des transferts d'humidité.

Les enduits produits avec du chanvre classique Chanvribat et du chanvre plus fin Terrachanvre ont des masses volumiques de 723 et 881 kg.m⁻³. Ces enduits ont des porosités totales de 72 et 66 %, majoritairement ouvertes (autour de 65%). Sur le plan hydrique :

- Les isothermes de sorption obtenues pour les deux types d'enduit sont similaires. Les teneurs en eau massique sont inférieures à celles du béton de chanvre de référence. Les teneurs en eau volumiques sont comparables, ainsi enduits et béton de chanvre conduisent à une même capacité d'adsorption d'eau pour un même volume.
- La perméabilité à la vapeur des enduits évolue progressivement sur tout le domaine d'hygrométrie. Le chanvre Terrachanvre, plus fin, conduit à une perméabilité plus faible tout au long du domaine.

Afin de modifier la cinétique de durcissement du béton de chanvre au jeune âge, deux approches ont été développées : le traitement de la chènevotte avec un produit hydrofugeant afin de limiter la quantité d'eau de gâchage, une modification du liant par substitution du liant Tradical PF70 par du sulfate de calcium anhydre afin d'accélérer la prise au jeune âge

Le traitement hydrofuge de la chènevotte a fait l'objet d'une optimisation du procédé. Les essais d'adsorption réalisés après traitement montrent que celui-ci affecte plus la cinétique d'adsorption que la teneur en eau limite adsorbée. En utilisation dans le béton de chanvre, la chènevotte traitée permet de réduire la durée de séchage du béton de chanvre. La masse volumique apparente est alors plus élevée, en lien avec une quantité d'eau excédentaire plus faible requise pour la mise en œuvre. Sur le plan hydrique, le traitement du chanvre impacte l'isotherme de sorption qui présente des teneurs en eau plus faibles sur l'ensemble du domaine d'hygrométrie. Ceci est d'autant plus marqué que l'hygrométrie est élevée. Le traitement du chanvre empêche l'eau de se fixer sur la chènevotte et de remplir les capillaires des parois des canaux. Enfin, la perméabilité à la vapeur mesurée au point (0 ; 50) est très légèrement inférieure à celle de la formulation de référence.

La substitution de liant Tradical PF70 par du sulfate de calcium conduit à des masses volumiques apparentes similaires, légèrement plus faibles que celle de la formulation de référence, quel que soit le taux de substitution du liant (autour de 390 kg.m⁻³). Cette substitution n'influe pas la porosité totale mais conduit à une porosité ouverte plus faible qui augmente avec le dosage en sulfate de calcium. Sur le plan hydrique :

- L'isotherme de sorption est peu modifiée pour des hygrométries inférieures à 90%HR. Au-delà, cette substitution conduit à des teneurs en eau plus élevées.
- La perméabilité à la vapeur des formulations modifiées est comparable à celle de la formulation de référence pour le point normatif (0 ; 50). Par contre, son évolution en fonction de l'hygrométrie n'a pas la même allure que celle de la formulation de référence. La perméabilité à la vapeur des formulations modifiées augmente en effet tout au long du domaine d'hygrométrie. Le sulfate de calcium a un impact limité sur les propriétés de stockage alors qu'il a un impact plus important sur les propriétés de transfert.
- Enfin, la substitution de Tradical PF70 par du sulfate de calcium améliore les performances mécaniques du béton de chanvre tant que la substitution reste inférieure à 33%. Un dosage optimum, de ce point de vue, reste à rechercher.

L'utilisation d'une chènevotte fibrée dans un béton de chanvre reste un sujet de discussion récurrent. Des éléments de discussion sont apparus à l'issue de notre étude. L'impact de l'utilisation de chanvre fibré sur la masse volumique apparente du béton de chanvre est à considérer en parallèle du mode de mise en œuvre. En effet, pour une même mise en œuvre, l'utilisation de chanvre fibré conduit à une masse volumique apparente de béton de chanvre plus élevée du fait d'une masse volumique apparente du chanvre fibré plus faible que celle du chanvre non fibré. Par contre, pour une mise en œuvre différente (projection/bétonnière) l'utilisation de chanvre fibré conduit à une

masse volumique plus faible du fait d'une quantité d'eau requise pour une fluidité équivalente plus importante. Sur le plan hydrique, le chanvre fibré ne change pas l'isotherme de sorption du béton de chanvre. Par contre, la perméabilité à la vapeur est modifiée. L'évolution de celle-ci avec l'hygrométrie a une allure comparable à celle de la formulation de référence associée mais le chanvre fibré conduit à des valeurs légèrement plus fortes pour les faibles et moyennes hygrométries et plus faibles pour les hautes hygrométries. Enfin, le chanvre fibré dégrade sensiblement les caractéristiques mécaniques du béton de chanvre en compression. L'effet de celui-ci sur les propriétés mécaniques en traction / flexion reste à explorer.

Par ailleurs, l'impact du phénomène de vieillissement/carbonatation est évalué sur des échantillons entièrement carbonatés au moyen d'un incubateur CO₂.

L'effet du vieillissement du béton de chanvre sur ses propriétés hydriques et mécaniques a été envisagé sur différentes compositions modifiées couplant des liants de type chaux hydraulique et sulfate de calcium. Le vieillissement par carbonatation a été réalisé à l'aide d'une enceinte CO₂ dans laquelle les échantillons ont été conservés durablement. Les mesures réalisées montrent que la carbonatation n'influe pas notablement sur la masse volumique apparente des bétons de chanvre.

Sur le plan hydrique :

- l'isotherme de sorption est comparable en cas de carbonatation ou non. La modification morphologique et chimique induite par la carbonatation se répercute essentiellement sur le développement de la première couche de molécules d'eau adsorbées. L'hystérésis sur les courbes de sorption obtenue en cas de carbonatation préalable est plus faible, soulignant qu'une partie de l'hystérésis de la formulation non carbonatée peut être attribuée à la carbonatation au cours de l'essai.

- La perméabilité à la vapeur est diminuée pour les faibles hygrométries et augmentée pour les hygrométries les plus élevées. La carbonatation induit un réseau plus tortueux qui limite les transferts sous forme vapeur et semble favoriser les transferts liquides.

Au bilan, l'effet des différents composants de bétons de chanvre a été analysé. Des modifications de formulations ou de constituants ont été proposées, elles ont permis d'améliorer les caractéristiques mécaniques sans dégrader les qualités hydriques du béton de chanvre.

Références Bibliographiques

- [AIT, 13] **Y. Ait Oumeziane**, «Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre», Thèse - Université de Rennes 1 - Rennes, France, 2013.
- [ARA, 12] **B. Aranda**, «Réactivité et durabilité de mélanges à base b Anhydrite III/b Anhydrite III' et de liants minéraux classiques.», Thèse - Université de Rennes 1 - Rennes, France, 2012.
- [AVI, 03] **Ecole d'avignon**, «Techniques et pratique de la chaux», Eyrolles, 2003.
- [BAU, 11] **C. Baux, M. Laurens, C. Lanos, A. Pierre, J. Guilbert, M. Guillaume, A. phelipot-Mardelé**, «Performances des ciments Sur-Sulfatés», XXIXème Rencontres Universitaires de Génie Civil - Tlemcen, Algérie, 2011.
- [BEA, 72] **Jacob Bear**, «Dynamics of fluids in porous media», Dover Publications, inc., 1972.
- [BEL, 99] **A. Belghit, M. Kouhila, B.C. Boutaleb**, «Approche expérimentale de la cinétique de séchage de la verveine (Lippia Citriodora)», Revue Energie renouvelable, v.2, p. 87-97, 1999.
- [BEV, 08] **R. Bevan, T. Woolley**, «Hemp Lime construction – a guide to building with hemp lime composites», HIS BRE Press, 2008.
- [BIH, 07] **Xavier Bihan**, «Caractérisation hydrique et mécanique de matériaux de génie civil à faible impact environnemental», Mémoire de stage - Master de recherche Sciences, technologies, santé, Mention Mécanique spécialité Ingénierie M2canique et Génie Civil, France, 2007.
- [BOU, 06] **Ministère de l'agriculture et de la pêche**, «Etude des caractéristiques environnementales du chanvre par l'analyse de son cycle de vie», France, 2006.
- [BRU,09] **Paulien Brigitte de Bruijn, Knut-Hakan Jeppsson, Kenneth Sandin, Christer Nilsson**, «Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres», Biosystems Engineering, v103, p474-479, 2009.
- [BRU, 69] **Stephen Brunauer, Jan Skalny, E. E. Bodor**, «Adsorption on Nonporous Solids», Journal of Colloid and interface science, vol 30, p546-552, 1969.
- [BRU,38] **Stephen Brunauer, P. H. Emmet, Edward Teller**, «Adsorption of Gases in Multimolecular Layers», 1938.
- [BUT, 04] **Pierre-Yves Bütschi**, «Utilisation du chanvre pour la préfabrication d'éléments de construction», Thèse - Université de Moncton, Canada, 2004.

- [CEC, 10] **Construire en Chanvre**, «Construire en Chanvre - Règles Professionnelles (RP2C)», France, 2010.
- [CER, 05] **V. Cerezo**, «Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de fibre végétales : Approche expérimentale et modélisation théorique», Thèse - Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, France, 2005.
- [CHA, 11] **Julien Chamoin, Florence Collet, Sylvie Pretot, Christophe Lannos**, «Réduction du pouvoir absorbant de chènevottes par traitement imperméabilisant», Matériaux & Techniques, Volume 99, Number 6, p.633-641, 2011, 2011.
- [CHA,10] **Julien Chamoin, Florence Collet, Sylvie Pretot**, «Perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre», XXVIIIème Rencontres Universitaires de Génie Civil - La Bourboule, France, 2010.
- [COL, 04] **F. Collet**, «Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie Civil à faible impacts environnementaux», Thèse - Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, France, 2004.
- [COL,07] **Florence Collet, Marjorie Bart, Laurent Serres, Jacques Miriel**, «Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials», Construction and building materials, 2007.
- [COL, 08] **F. Collet, S. Pretot, P. Salagnac, P. Glouannec**, «Thermal Properties of Hempcrete: Variations versus Density and Water Content», 18th European Conference on Thermophysical Properties, 31 aout-4 septembre 2008, Pau, France, 2008.
- [COL,09] **Florence Collet, Sylvie Pretot**, «Caractérisation hydrique de béton de chanvre projeté. Possibilité de mesure en régime dynamique?», AUGC2009, v03/46, p1-14, France, 2009.
- [CON, 07] **A.B. Constatinos, G.G. Athina, G. Elena, M. Sevastianos, M. Yiannis, P.L. Dimitris**, «European residential buildings stock, energy consumption, emissions and potential energy savings», Buildings and environment, Vol.42, p.1298-1314, 2007.
- [COU, 98] **I. Couedel**, «Le béton de chanvre comme matériau de construction, première approche mécanique du béton de chanvre», Rapport de DEA, ENTPE, 1998.
- [CRA, 83] **Pierre Crausse**, «Etude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieux poreux non saturé», Thèse - Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 1983.
- [DER, 08] **D. Derome, H. Derluyn, W.A. Zillig, J. Carmeliet**, «Model for hysteretic moisture behaviour of wood», Proceedings of the Nordic Symposium on Building Physics, vol.2, p.959-966, Danemark, 2008.

- [DES, 05] **V. Desarnaulds, E. Costanzo, A. Carvalho, B. Arlaud**, «Sustainability of acoustic materials and acoustic characterization of sustainable materials», Twelfth International Congress on Sound and Vibration, Lisbon, Portugal, 11-14 juillet 2005, Portugal, 2005.
- [DEV, 58] **D.A. De Vries**, « Simultaneous transfert of heat and moisture in porous media», Transaction of The American Geophysical Union, vol 39, n°5, pp 909-916, 1958.
- [DIA, 08] **U.V. Diana, N. Aleksandra**, «Potentials and cost of carbon dioxide mitigation in the word's buildings», Energy Policy, Vol36, p642-661, 2008.
- [DIN, 99] **I. Dincer**, «Environmentals impacts of energy», Energy Policy, Vol.27, p845-854, 1999.
- [DIQ, 11] **Y. Diquelou, E. Gourlay, L. Arnaud, B. Kurek**, «Effect of woody hemp core on the setting of cementitious binders in lightweight concrete», WOODCHEM 2011, 2011.
- [DON,98] **M. D. Donohue, G. L. Aranovich**, «Adsorption Hysteresis in Porous Solids», Journal of Colloid and interface science, vol205, p121-130, 1998.
- [ELF,08] **S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancret, Y. Scudeller, L. Goudet**, «Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hemcrete") manufactured by a projection process», Construction and Building Materials, v22, p2116-2123, 2008.
- [EVR, 06] **Arnaud Evrard**, «Sorption behavior of Lime-Hemp Concrete and its relation to indoor comfort and energy», PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Genève, Suisse, 6-8 septembre 2006., Suisse, 2006.
- [EVR, 08] **A. Evrard**, «Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials», Thèse - Université Cahtolique de Louvain, 2008.
- [FAO, 10] http://www.fao.org/index_fr.htm, 2010.
- [GAL, 97] **G.H. Galbraith, R.C. McLean, J.Guo**, «Moisture permeability data presented as a mathematical function applicable to heat and moisture transport models», 5eme International IBPSA Conference proceedings, Prague, République Tchèque, 1997.
- [GAR, 12] **C. Garnier, S. Pretot, F. Collet**, «Life assessment of hemp concrete wall manufactured by spraying », 2nd International conference on building energy and environment, Boulder, Colorado, 1er au 4 août 2012.
- [GLO, 10] **P. Glouannec, F. Collet, C. Lanos, P. Mounanga, T. Pierre, P. Poullain, S. Pretot, J. Chamoin, A. Zaknounge** «Influence de la for-

mulation et du procédé de mise en oeuvre sur les propriétés thermique, mécanique et hydrique du béton de chanvre», Colloque Matériaux - Génie civil et habitat du futur, Nantes, Octobre 2010.

- [GLO, 11-1] **P. Glouannec, F. Collet, C. Lanos, P. Mounanga, T. Pierre, P. Poullain, S. Pretot**, «Propriétés physiques de bétons de chanvre», Matériaux & Techniques, Volume 99, Number 6, p.657-665, 2011.
- [GLO, 11-2] **P. Glouannec et al.**, «Projet ANR-06-MAPR-0002 Béton Chanvre», France, 2011.
- [GON, 06] **M.J. Gonzales, J.G. Navarro**, «Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of the three houses of low environmental impact.», Buildings and environment, Vol.41, p.902-909, 2006.
- [HAR, 44] **W.D. Harkins, G. Jura**, Journal American chemical society, vol.66, p.1362-1366, 1944.
- [HEN, 52] **S.M. Henderson**, «A basic concept of equilibrium moisture», Agricultural Engineering, v.33, N°1, p.29-32, 1952.
- [HOU, 07] **T.A. Houssein**, «Water sorption isothermes of Libyan Date paste», Thèse - the middle east technical university, 2007.
- [HQE, 12] <http://assohqe.org/hqe/>,
- [HUS, 08] **Y. Hustache, L. Arnaud**, «Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre», Construire en chanvre, 2008.
- [ISO, 12570] **NF EN ISO 12570**, «« Détermination du taux d'humidité par séchage à chaud», 2000.
- [ISO, 12571] **NF EN ISO 12571**, ««Détermination des propriétés de sorption hygroscopique», 2000.
- [ISO, 12572] **NF EN ISO 12572**, ««Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau», 2001.
- [IUP, 85] **K.S.W. Sing, D.H. Everett, R.A.W. Haul, L. Moscou, R.A. Pierotti, J. Rouquérol, T. Siemieniewska**, «Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity», Pure & Appl. Chem., v57, p603-619, 1985.

- [IUP, 94] **International Union of Pure and Applied Chemistry**, «Recommendations for the characterization of porous solids», Pure & Appl. Chem., v66, n°8, pp 1739-1758, 1994.
- [KOR,08] **Suleyman Korkut**, «The effects of heat treatment on some technological properties in Uludag fir (*Abies bornmuelleriana* Mattf.) wood», Building and environment, v43, p422-428, 2008.
- [LAN,10] **C. Lanos, P. Glouannec, P. Mounanga, F. Collet, T. Pierre, P. Poulain, S. Pretot**, « Construire et réhabiliter : vers quelles solutions d'isolation ? », Colloque Matériaux - Génie civil et habitat du futur, Nantes, Octobre 2010.
- [LAN,18] **I. Langmuir**, «The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and Platinum», Journal of the American Chemical Society, vol 40, pp 1361-1403,1918.
- [LAW, 06] **I. Langmuir, M. Lawrence, T.J. Mays, P. Walker, D. D'Ayala** « Determination of carbonation profiles in non-hydraulic lime mortars using thermogravimetric analysis », Thermochemica Acta, 444 (2), pp. 179-189, 2006.
- [MAG, 10] **Camille Magniont**, «Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources», Thèse - Université de Toulouse II - Paul sabatier, France, 2010.
- [MER, 87] **L. Merouani**, «Phénomène de sorption et de transfert d'humidité dans les bâtiments. Etude expérimentale comparative d'un mortier de ciment et d'un enduit de façade», Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, nov. 1987.
- [MOU,09] **Pierre Mounanga, Philippe Poullain, Guy Bastian, Patrick Glouannec, Hamid Khelifi**, «Influence de la composition et du mode de mise en œuvre sur le développement des propriétés mécaniques du béton de chanvre», AUGC2009,v02/05, p1-11, France, 2009.
- [NGU, 10] **T.T. Nguyen**, «Contribution à l'étude de la formation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre», Thèse - Université de Bretagne Sud, France, 2010.
- [NOZ, 12] **Vincent Nozahic**, «Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal – Application à des granulats de chènevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux», Thèse – Université Blaise Pascal - Clermont II, France, 2012.
- [OSW, 46] **C. Oswin**, Journal of the Society of Chemical Industry, London, vol.65, p.419-421, 1946.

- [PAC,10] **Fernando Pacheco-Torgal, Said Jalali**, «Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres : A review», *Construction and Building Materials*, 2010.
- [PAV, 11] **Zbysek Pavlik, Jaromir zumar, Milena Pavlikova, Robert Cerny**, «A boltzmann transformation method fo inversigation of water vapor transport in building materials», *Journal of building physics*, 2011.
- [PEJ,08] **Biljana M. Pejic, Mirjana M. Kostic, Petar D. Skundric, Jovana Z. Praskalo**, «The effects of hemicelluloses and lignin removal on water uptake behavior of hemp fibers», *Bioresource Technology*, v99, p7152-7159, 2008.
- [PER,98] **B. Perrin, V. Baroghel Bouny, L. Chemloul**, «Méthodes de détermination de la diffusivité hydrique de pâtes de ciments durcies», *Materials and Structures/ Matériaux et Constructions*, v31, p235-241, 1998.
- [PRE, 09] **S. Pretot, F. Collet, P. Glouannec, V. Lang**, «Variation des propriétés thermiques de bétons de chanvre en fonction de la formulation», *Congrès français de thermique-Efficacité énergétique*, Vannes 2009, Tome 2, pp 865-870, Editions Société Française de Thermique, ISBN : 2-905267-67-2, France, 2009.
- [REP,06] **Vincent Repellin**, «Optimisation des paramètres durée et température d'un traitement thermique du bois. Modification des propriétés d'usage du bois en relation avec les modifications physico-chimiques et ultrastructurales occasionnées par le traitement thermique.», Thèse - Ecole Nationale supérieure des mines, Saint-Etienne, France, 2006.
- [SAM, 08] **D. Samri**, «Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : Approche expérimentale et modélisation numérique», Thèse - Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, France, 2008.
- [SED,08] **D. Sedan, C. Pagnoux, A. Smith, T. Chotard**, «Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement : Influence of the fibre/matrix interaction», *Journal of the European Ceramic Society*, v28, p183-192, 2008.
- [SEY,03] **Gill Seyfang**, «Environmental mega-conferences - from Stockholm to Johannesburg and beyond», *Global Environmental Change*, v13, p223-228, 2003.
- [SMI, 47] **S. Smith**, «The sorption of water vapor by high polymers», *Journal of the American Chemical Society*, vol.69, p.646-651, 1947.
- [TAD, 05] **Shinkaku Tada, Kazumasa Watanabe**, «Dynamic determination of sorption isotherm of cement based materials», *Cement and concrete research*, vol 35, p2271-2277, 2005.

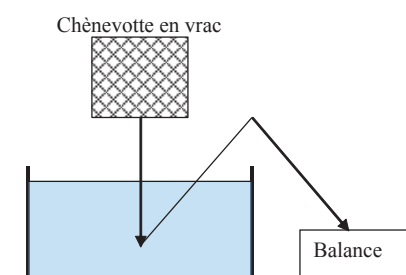
- [TOO, 04] **Marcel A.J. Toonen, Chris Maliepaard, Theo H. Reijmers, Hilko van der Voet, H. Dick Mastebroek, Hetty C. van den Broek, Michel J.M. Ebskamp**, «Predicting the chemical composition of fibre and core fraction of hemp (*cannabis sativa* L.)», *Euphytica*, v140, p39-45, 2004.
- [TRA, 10] **Anh Dung Tran LE**, «Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment», Thèse - Université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2012.
- [TRA,10-2] **A.D. Tran Le, C. Maalouf, T.H. Mai, E. Wurtz, F. Collet**, «Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelop», *Energy and Buildings*, v42, p1797-1806, 2010.
- [VER,01] **Michel Vernois**, «Heat treatment of wood in France - state of the art», Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, Paris, France, 2001.
- [VIL,07] **Géraldine Villain, Dominique Cochet, Gérard Olivier, Mickaël Thiery**, «Vers un mode opératoire performant et discriminant de carbonatation accélérée des bétons pour ouvrages d'art», *BLPC*, v267, p63-78, 2007.
- [ZAK,11] **A. Zaknune**, «Etude du comportement thermohydrrique de matériaux "chanvre-chaux lors de la phase de séchage - Estimation par technique inverse des propriétés hydriques», Thèse de doctorat, UBS UEB, Lorient, France, 2012.

Annexes

ANNEXE I	ESSAI D'ABSORPTION D'EAU	168
ANNEXE II	METHODE PYCNOMETRIQUE	169
II.I	Mode opératoire	169
II.II	Appareillage.....	170
ANNEXE III	RESULTATS « MUR » - « REFERENCE »	171
III.I	Cinétiques de séchage.....	171
III.II	Sorption	172
III.III	Perméabilité à la vapeur	173
ANNEXE IV	- RESULTATS « VARIANTE : TAUX DE COMPACTAGE » ...	174
IV.I	Cinétiques de séchage.....	174
IV.II	Sorption	175
IV.III	Perméabilité à la vapeur	176
ANNEXE V	RESULTATS « VARIANTE : TAUX DE LIANT »	177
V.I	Cinétiques de séchage.....	177
V.II	Sorption	178
V.III	Perméabilité à la vapeur	179
ANNEXE VI	RESULTATS « VARIANTE : TYPE DE LIANT »	180
VI.I	Cinétiques de séchage.....	180
VI.II	Sorption	181
VI.III	Perméabilité à la vapeur	182
VI.IV	Propriétés mécaniques	183
ANNEXE VII	RESULTATS « VARIANTE : TYPE DE CHANVRE »	189
VII.I	Cinétiques de séchage.....	189
VII.II	Sorption	190
VII.III	Perméabilité à la vapeur	191
VII.IV	Propriétés mécaniques	192
ANNEXE VIII	RESULTATS « LIANTS ET ENDUITS »	194
VIII.I	Cinétiques de séchage.....	194
VIII.II	Sorption	195
VIII.III	Perméabilité à la vapeur	198

Annexe I Essai d'absorption d'eau

La quantification de l'eau absorbée par les chènevottes s'appuie sur un test de mouillage qui consiste à réaliser un suivi massique de chènevottes immergées [NF V19-002]. Les chènevottes sont placées dans un contenant permettant la libre circulation de l'eau (Figure Annexe I.1). Ce contenant est plongé dans un bac d'eau, puis les chènevottes sont pesées à des temps de 10 secondes, 30 secondes, 1 minute, 3 minutes, 5 minutes, 15 minutes et 30 minutes.



10s, 30s, 1min, 3 mins, 5mins,
15 mins, 30 mins.

Annexe I.1 Banc expérimental

Annexe II Méthode Pycnométrique

II.I Mode opératoire

Une fiole pycnométrique permet de travailler à volume constant grâce à un repère situé dans une partie rétrécie, afin d'augmenter la précision des mesures. L'échantillon étudié, préalablement broyé, est placé dans le pycnomètre qui est ensuite rempli à l'aide d'un liquide. Ce liquide, chimiquement inerte avec le matériau permet de compléter le volume non occupé par l'échantillon solide. Dans notre cas, le liquide sera de l'acétone. Afin de s'assurer que tous les vides sont comblés par le liquide, l'ensemble est régulièrement agité, complété par le liquide et pesé jusqu'à stabilisation de la masse. Il est également nécessaire de déterminer le volume du pycnomètre ainsi que la masse volumique du liquide.

Le mode opératoire utilisé est :

- M_0 : Masse pycnomètre vide
- M_1 : Masse pycnomètre vide + Matériau
- M_2 : Masse pycnomètre vide + Matériau + Acétone
- M_3 : Masse pycnomètre vide + Acétone
- M_4 : Masse pycnomètre vide + Eau distillée

Ces pesées permettent de déterminer :

La masse de l'échantillon :

$$M_{\text{matériau}} = M_1 - M_0 \quad [E \text{ Annexe II.1}]$$

La masse d'acétone pour remplir le pycnomètre :

$$M_{\text{acétone}} = M_3 - M_0 \quad [E \text{ Annexe II.2}]$$

La masse d'eau pour remplir le pycnomètre :

$$M_{\text{eau}} = M_4 - M_0 \quad [E \text{ Annexe II.3}]$$

La masse d'acétone pour compléter le pycnomètre avec l'échantillon :

$$M_{\text{acétone ajouté}} = M_2 - M_1 \quad [E \text{ Annexe II.4}]$$

Le volume du pycnomètre :

$$V_{\text{pycnomètre}} = \frac{M_{\text{eau}}}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{M_4 - M_0}{\rho_{\text{eau}}} \quad [E \text{ Annexe II.5}]$$

La masse volumique de l'acétone :

$$\rho_{\text{acétone}} = \frac{M_{\text{acétone}}}{V_{\text{pycnomètre}}} = \frac{(M_3 - M_0)\rho_{\text{eau}}}{M_4 - M_0} \quad [E \text{ Annexe II.6}]$$

Le volume occupé par l'acétone dans le pycnomètre avec le matériau :

$$V_{\text{acétone ajouté}} = \frac{M_{\text{acétone ajouté}}}{\rho_{\text{acétone}}} = \frac{M_2 - M_1}{\rho_{\text{acétone}}} \quad [E \text{ Annexe II.7}]$$

Le volume occupé par l'échantillon dans le pycnomètre :

$$\begin{aligned} V_{\text{matériau}} &= V_{\text{pycnomètre}} - V_{\text{acétone ajouté}} = \frac{M_4 - M_0}{\rho_{\text{eau}}} - \frac{M_2 - M_1}{\rho_{\text{acétone}}} \\ &= \frac{M_4 - M_0}{\rho_{\text{eau}}} - \frac{M_2 - M_1}{\frac{M_3 - M_0}{M_4 - M_0}} = \frac{M_4 - M_0}{\rho_{\text{eau}}} \left(1 - \frac{M_2 - M_1}{M_3 - M_0} \right) \end{aligned} \quad [E \text{ Annexe II.8}]$$

La masse volumique réelle de l'échantillon :

$$\rho_s = \frac{M_{\text{matériau}}}{V_{\text{matériau}}} = \frac{M_1 - M_0}{\frac{M_4 - M_0}{\rho_{\text{eau}}} \left(1 - \frac{M_2 - M_1}{M_3 - M_0} \right)} = \frac{(M_1 - M_0)\rho_{\text{eau}}}{(M_4 - M_0) \left(1 - \frac{M_2 - M_1}{M_3 - M_0} \right)} \quad [E \text{ Annexe II.9}]$$

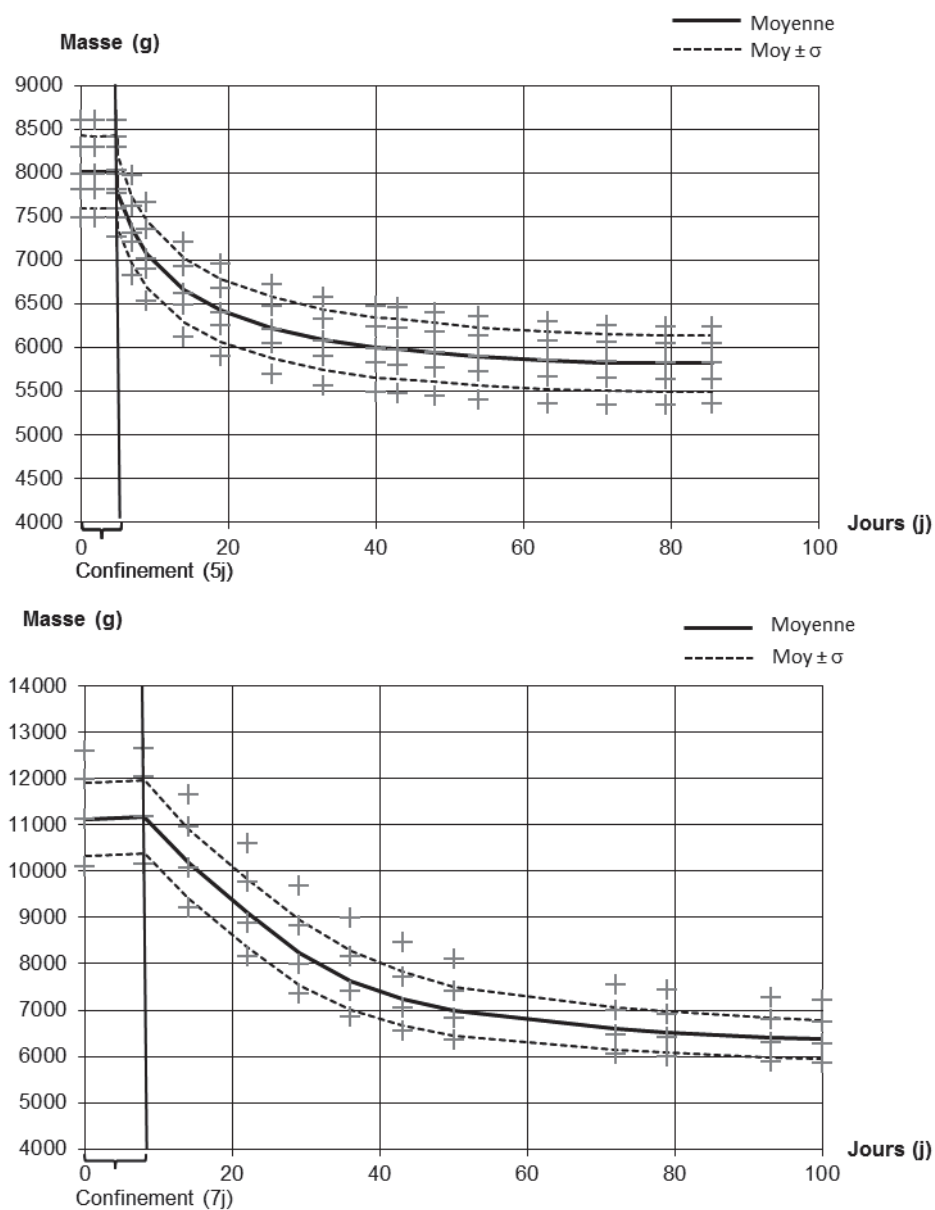
II.II Appareillage

Les pycnomètres utilisés ont des volumes de l'ordre 0,25 – 0,6 – 1 dm³ en fonction des échantillons.

La balance est une balance Sartorius LP 8200 S ayant une portée de 8kg et une précision de 0,04g.

Annexe III Résultats « Mur » - « Référence »

III.I Cinétiques de séchage



Annexe III.1 Evolution de la masse en fonction du temps
Haut : SI2C Référence - Bas : Easy-chanvre Référence

III.II Sorption

	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,007	0,004	0,005	0,011	0,024	0,029	0,044	0,086
	b			0,718	0,871	0,635	0,541	0,383	0,830	0,870	0,937
	c			-1,330	-1,048	-0,222	-0,086	-0,167	-0,219	-0,118	-0,051
	we			0,010	0,014	0,019	0,030	0,053	0,083	0,128	0,215
	R ²			0,994	0,985	0,953	0,900	0,851	0,994	0,992	0,998
Désorption	a	0,006	-0,010	-0,016		-0,015	-0,033	-0,024	-0,074		
	b	0,850	0,850	0,610		0,568	0,465	0,633	0,639		
	c	-0,326	-0,122	-1,057		-0,264	-0,473	-0,394	-0,395		
	we	0,037	0,030	0,041		0,057	0,072	0,106	0,130		
	R ²	0,89	0,9731	0,980		0,938	0,942	0,967	0,975		
	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,002	0,003	0,003	0,006	0,022	0,055	0,114	0,238
	b			0,077	0,184	0,527	0,333	0,414	0,887	0,921	0,976
	c			-0,798	-0,681	-0,474	-0,281	-0,208	-0,205	-0,092	-0,035
	we			0,002	0,005	0,008	0,013	0,036	0,088	0,203	0,438
Désorption	a	0,008	-0,007	-0,010		-0,010	-0,034	-0,044	-0,254		
	b	0,656	0,833	0,357		0,500	0,426	0,725	0,821		
	c	-0,027	-0,144	-0,600		-0,500	-0,554	-0,481	-0,221		
	we	0,023	0,015	0,022		0,032	0,042	0,077	0,118		

Tableau Annexe III.1 Coefficient des paramètres des cinétiques
Haut : SI2C Référence - Bas : Easy-chanvre Référence

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,49%	0,97%	1,37%	1,86%	3,00%	5,32%	8,27%	12,76%	21,47%
	Ecart type	0,00%	0,07%	0,07%	0,09%	0,10%	0,28%	0,23%	0,23%	0,50%	2,26%
Dés.	Moyenne	3,68%	3,03%	4,06%		5,66%	7,25%	10,56%	13,04%		
	Ecart type	0,28%	0,26%	0,26%		0,27%	0,31%	0,32%	0,35%		
Δw		3,68%	2,54%	3,09%		3,80%	4,25%	5,24%	4,77%		

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,00%	0,24%	0,51%	0,78%	1,34%	3,57%	8,81%	20,31%	43,77%
	Ecart type	0,00%	0,00%	0,03%	0,06%	0,18%	0,16%	0,27%	1,36%	3,45%	8,41%
Dés.	Moyenne	1,52%	1,50%	2,19%		3,21%	4,20%	7,71%	11,80%		
	0	0,47%	0,48%	0,49%		0,49%	0,46%	0,49%	1,11%		
Δw		1,52%	1,50%	1,95%		2,42%	2,86%	4,15%	2,99%		

Tableau Annexe III.2 Isotherme de sorption – teneur en eau obtenue par modélisation des cinétiques sur les formulations de Référence
Haut : SI2C – Bas : Easy-Chanvre

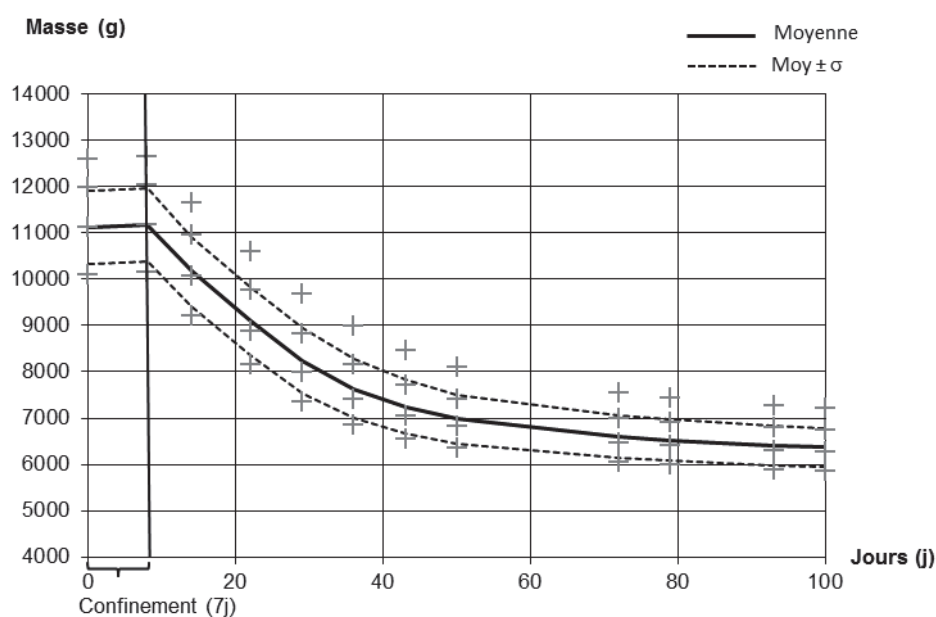
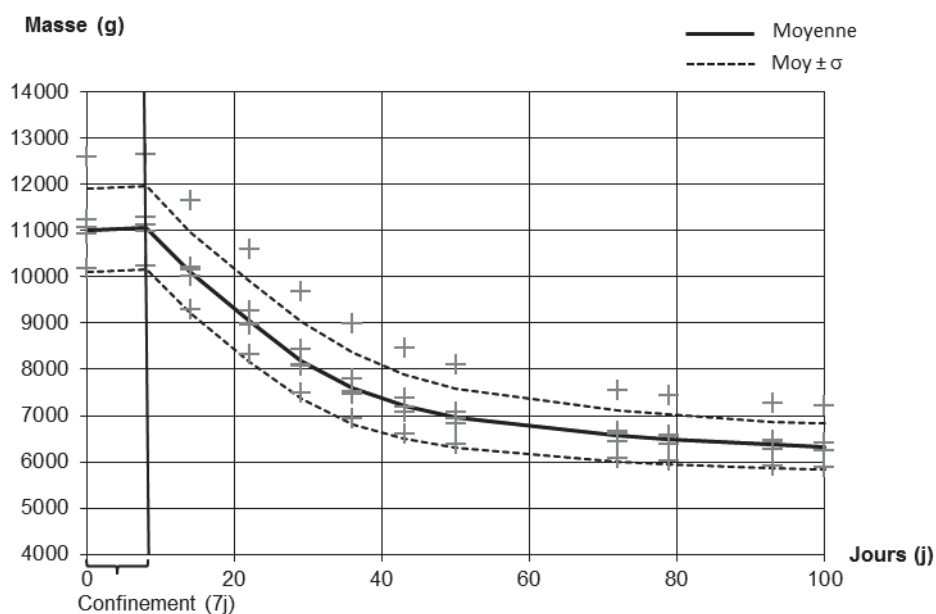
III.III Perméabilité à la vapeur

	HR _i	0	0	23	23	43	58	81	81
	HR _e	50	23	33	43	58	81	90	94
SI2C Référence	$\pi \times 10^{11}$ [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]	2,92	3,24	13,90	3,86	4,82	5,32	17,48	21,30
	R ²	0,998	0,994	0,993	1,000	0,999	0,995	0,995	0,996
Easy-Chanvre Référence	$\pi \times 10^{11}$ [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]	2,93	4,42	11,23	5,83	4,83	5,64	13,36	14,57
	R ²	0,998	0,991	0,993	1,000	0,999	0,997	0,994	0,996

Tableau Annexe III.3 Perméabilité à la vapeur d'eau ($\pi \times 10^{11}$) en fonction du couple d'humidité (HR_i ; HR_e)

Annexe IV - Résultats « Variante : Taux de compactage »

IV.I Cinétiques de séchage



Annexe IV.1 Evolution de la masse en fonction du temps
Haut : Easy-Chanvre Variante 1 / Bas : Easy-Chanvre Variante 2

IV.II Sorption

	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,007	0,004	0,004	0,009	0,034	0,070	0,169	0,357
	b			0,221	0,498	0,622	0,407	0,543	0,908	0,934	0,977
	c			-0,713	-0,495	-0,226	-0,136	-0,232	-0,201	-0,081	-0,035
	we			0,010	0,014	0,018	0,027	0,062	0,128	0,298	0,646
Désorption	a	0,002	-0,009	-0,009		-0,011	-0,041	-0,067	-0,395		
	b	2,982	0,810	0,295		0,500	0,422	0,768	0,825		
	c	-0,703	-0,112	-0,650		-0,500	-0,552	-0,491	-0,200		
	we	0,031	0,029	0,038		0,048	0,059	0,100	0,160		

	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,005	0,003	0,004	0,008	0,021	0,027	0,070	0,151
	b			0,425	0,500	0,638	0,520	0,413	0,790	0,924	0,964
	c			-0,789	-0,500	-0,279	-0,082	-0,141	-0,223	-0,100	-0,041
	we			0,007	0,009	0,013	0,022	0,042	0,068	0,139	0,289
Désorption	a	0,007	-0,006	-0,009		-0,008	-0,024	-0,026	-0,158		
	b	2,308	0,840	0,306		0,500	0,425	0,637	0,864		
	c	-0,255	-0,169	-0,627		-0,500	-0,549	-0,452	-0,322		
	we	0,033	0,026	0,032		0,042	0,049	0,073	0,098		

Tableau Annexe IV.1 Coefficient des paramètres des cinétiques
Haut : Easy-Chanvre Variante 1 / Bas : Easy-Chanvre Variante 2

Annexes IV – Résultats expérimentaux - « Variante : Taux de compactage »

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,57%	1,03%	1,41%	1,84%	2,70%	6,16%	12,82%	29,84%	64,58%
	Ecart type	0,00%	0,23%	0,23%	0,25%	0,26%	0,29%	0,72%	2,35%	6,43%	13,54%
Dés.	Moyenne	2,92%	2,89%	3,80%		4,78%	5,88%	10,05%	16,02%		
	0,002315	0,37%	0,37%	0,33%		0,30%	0,27%	0,64%	2,18%		
Δw		2,92%	2,32%	2,77%		2,93%	3,18%	3,89%	3,20%		

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,31%	0,65%	0,95%	1,33%	2,16%	4,18%	6,82%	13,91%	28,86%
	Ecart type	0,00%	0,20%	0,24%	0,23%	0,23%	0,28%	0,44%	1,57%	4,93%	11,96%
Dés.	Moyenne	3,30%	2,61%	3,21%		4,15%	4,91%	7,34%	9,76%		
	0,001964	0,64%	0,22%	0,22%		0,21%	0,29%	0,75%	1,66%		
Δw		3,30%	2,30%	2,56%		2,83%	2,75%	3,16%	2,94%		

Tableau Annexe IV.2 Isotherme de sorption – teneur en eau obtenue par modélisation des cinétiques sur les formulations Variante « Taux de compactage »
Haut : Easy-Chanvre Variante 1 / Bas : Easy-Chanvre Variante 2

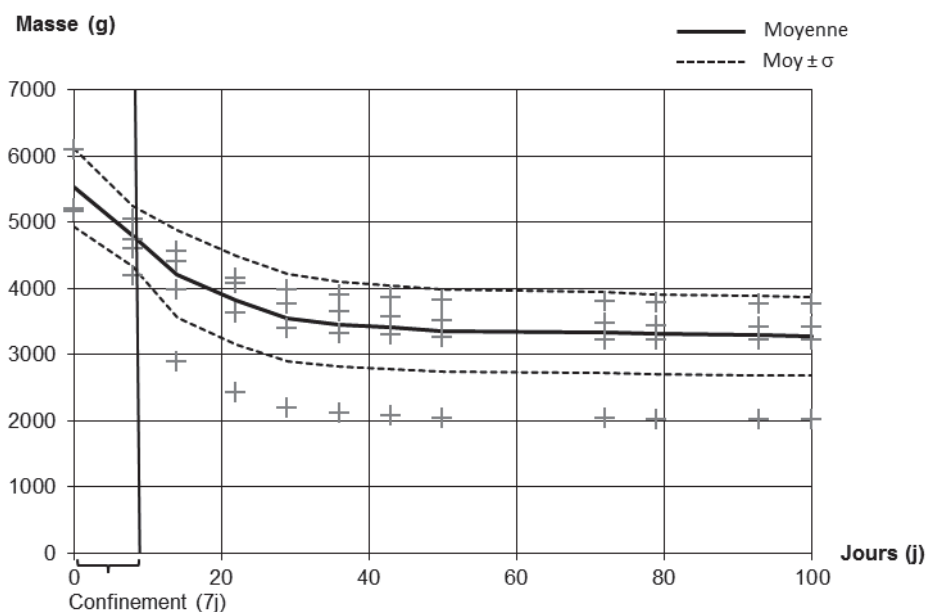
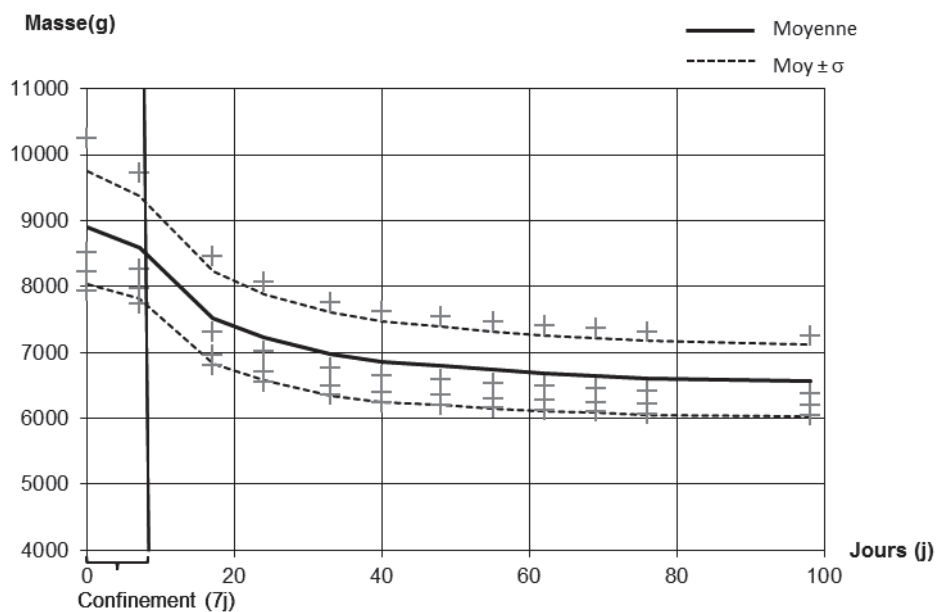
IV.III Perméabilité à la vapeur

HR _i	0	0	23	23	43	58	81	81
HR _e	50	23	33	43	58	81	90	94
Easy R	2,93	4,42	11,23	5,83	4,83	5,64	13,36	14,57
Easy V1	3,06	4,53	13,36	5,03	19,13	5,72	-	-
Easy V2	2,89	3,43	7,81	3,86	4,43	2,95	-	-

Tableau Annexe IV.3 Perméabilité à la vapeur d'eau ($\pi \times 10^{11}$) en fonction du couple d'humidité (HR_i ; HR_e)

Annexe V Résultats « Variante : Taux de liant »

V.I Cinétiques de séchage



Annexe V.1 Evolution de la masse en fonction du temps
Haut : SI2C Dalle / Bas : SI2C Toiture

V.II Sorption

	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,006	0,003	0,004	0,009	0,020	0,026	0,038	0,051
	b			0,714	0,820	0,861	0,576	0,321	0,749	0,848	0,927
	c			-1,335	-1,072	-0,589	-0,256	-0,149	-0,191	-0,127	-0,078
	we			0,005	0,008	0,012	0,021	0,040	0,066	0,104	0,156
Désorption	a	0,004	-0,007	-0,016		-0,015	-0,030	-0,018	-0,041		
	b	1,183	0,764	0,820		0,658	0,507	0,632	0,496		
	c	-0,530	-0,176	-1,127		-0,397	-0,480	-0,450	-0,370		
	we	0,027	0,023	0,031		0,047	0,063	0,094	0,112		
	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a				0,005		0,019	0,032		0,177	0,213
	b				0,542		0,200	0,794		0,584	0,879
	c				-0,293		-0,116	-0,228		-0,168	-0,096
	we				0,016		0,035	0,066		0,242	0,456
Désorption	a	0,004	-0,010	-0,015		-0,020	-0,045	-0,045	-0,275		
	b	0,636	0,727	0,081		0,430	0,254	0,455	0,653		
	c	-0,288	-0,099	-0,756		-0,131	-0,477	-0,501	-0,537		
	we	0,052	0,047	0,057		0,068	0,088	0,134	0,180		

Tableau Annexe V.1 Coefficient des paramètres des cinétiques
Haut : SI2C Dalle / Bas : SI2C Toiture

Annexes V – Résultats expérimentaux - « Variante : Taux de liant »

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,13%	0,46%	0,78%	1,18%	2,07%	4,01%	6,62%	10,45%	15,56%
	Ecart type	0,00%	0,17%	0,30%	0,30%	0,27%	0,16%	0,10%	0,20%	0,37%	1,35%
Dés.	Moyenne	2,70%	2,30%	3,09%		4,72%	6,32%	9,38%	11,22%		
	0,001719	0,10%	0,08%	0,08%		0,10%	0,11%	0,10%	0,15%		
Δw		2,70%	2,17%	2,63%		3,53%	4,25%	5,37%	4,59%		

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	1,27%		1,64%		3,51%	6,62%		24,17%	45,58%
	Ecart type	0,00%	0,19%		0,31%		0,60%	0,77%		9,48%	20,21%
Dés.	Moyenne	5,15%	4,70%	0,0571		0,0681	8,84%	13,42%	0,1799		
	0,001906	0,68%	0,57%	0,0066		0,0071	0,92%	1,91%	0,0368		
Δw		5,15%	3,43%				5,34%	6,81%			

Tableau Annexe V.2 Isotherme de sorption – teneur en eau obtenue par modélisation des cinétiques sur les formulations Variante « Taux de Liant »
Haut : SI2C Dalle / Bas : SI2C Toiture

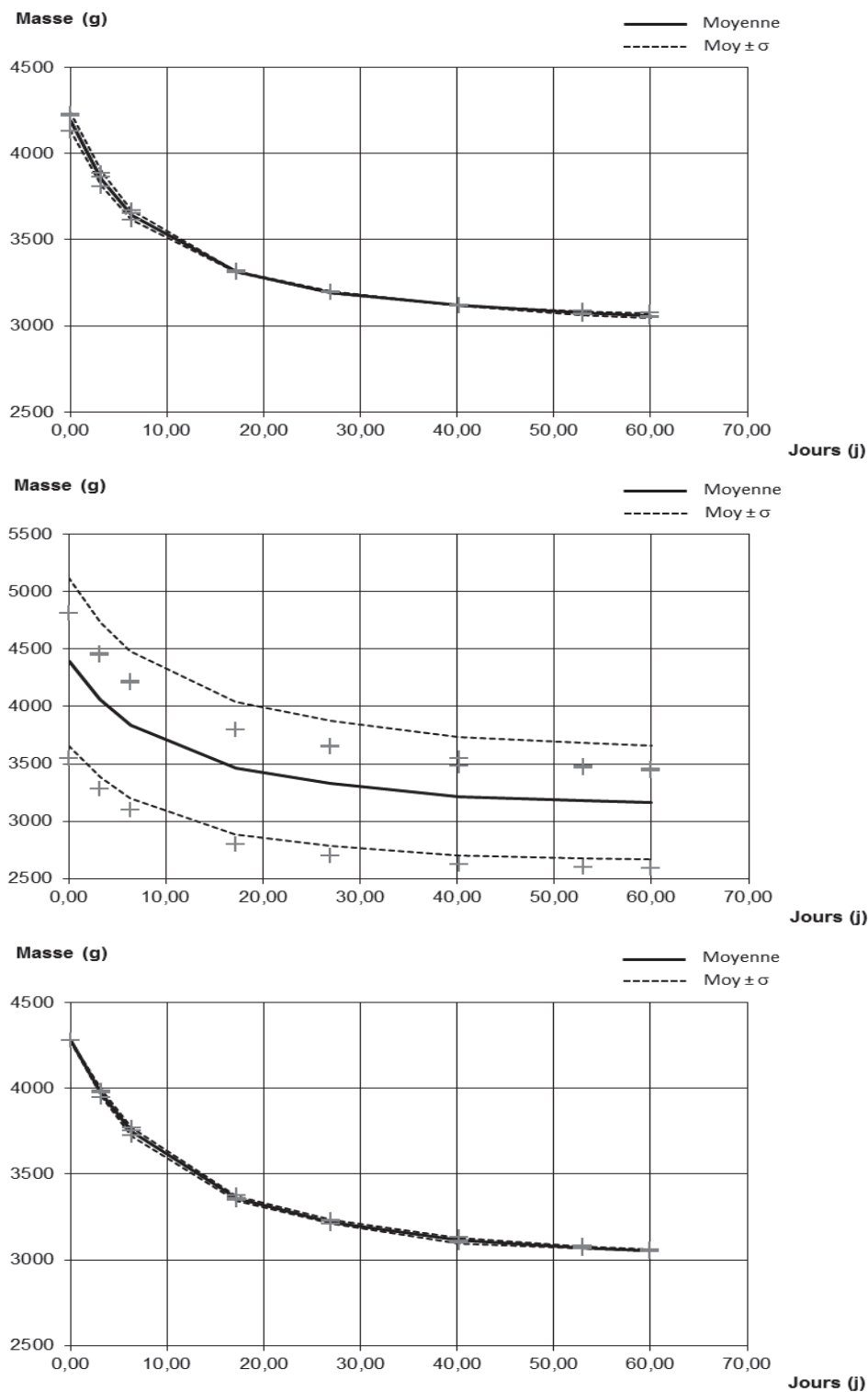
V.III Perméabilité à la vapeur

HR _i	0	0	23	23	43	58	81	81
HR _e	50	23	33	43	58	81	90	94
SI2C R	2,92	3,24	13,90	3,86	4,82	5,32	17,48	21,30
SI2C D	2,49	4,82	8,63	3,30	4,13	4,22	-	-

Tableau Annexe V.3 Perméabilité à la vapeur d'eau ($\pi \times 10^{11}$) en fonction du couple d'humidité (HR_i ; HR_e)

Annexe VI Résultats « Variante : Type de liant »

VI.I Cinétiques de séchage



Annexe VI.1 Evolution de la masse en fonction du temps
Haut : Laboratoire F1 / Milieu : Laboratoire F3 / Bas : Laboratoire F4

VI.II Sorption

	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,007	0,004	0,005	0,019	0,036	0,040	0,080	0,131
	b			0,224	0,488	0,545	0,652	0,350	0,662	0,835	0,922
	c			-0,676	-0,500	-0,213	-0,040	-0,065	-0,169	-0,128	-0,073
	we			0,008	0,012	0,017	0,036	0,069	0,104	0,185	0,317
Désorption	a	0,003	-0,009	-0,012		-0,012	-0,034	-0,031	-0,153		
	b	1,543	0,729	0,325		0,500	0,336	0,631	0,461		
	c	-0,507	-0,129	-0,604		-0,500	-0,600	-0,562	-0,361		
	we	0,060	0,057	0,066		0,078	0,090	0,125	0,156		

	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,006	0,004	0,004	0,014	0,036	0,035	0,073	0,118
	b			0,156	0,521	0,530	0,556	0,343	0,547	0,812	0,927
	c			-0,741	-0,452	-0,273	-0,046	-0,062	-0,154	-0,151	-0,078
	we			0,008	0,012	0,017	0,031	0,065	0,096	0,171	0,291
Désorption	a	0,003	-0,009	-0,012		-0,010	-0,029	-0,030	-0,141		
	b	0,578	0,714	0,315		0,500	0,265	0,465	0,497		
	c	-0,410	-0,112	-0,608		-0,500	-0,639	-0,488	-0,477		
	we	0,054	0,051	0,060		0,071	0,082	0,112	0,142		

	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,006	0,004	0,004	0,007	0,030	0,043	0,086	0,165
	b			0,117	0,398	0,511	0,301	0,276	0,506	0,794	0,924
	c			-0,775	-0,565	-0,487	-0,623	-0,115	-0,211	-0,177	-0,085
	we			0,003	0,007	0,011	0,018	0,047	0,086	0,174	0,341
Désorption	a	0,004	-0,008	-0,010		-0,010	-0,030	-0,036	-0,210		
	b	1,713	0,782	0,373		0,500	0,253	0,455	0,697		
	c	-0,512	-0,114	-0,558		-0,500	-0,602	-0,563	-0,618		
	we	0,035	0,029	0,037		0,047	0,056	0,087	0,123		

Tableau Annexe VI.1 Coefficient des paramètres des cinétiques
Haut : Laboratoire F1 / Milieu : Laboratoire F3 / Bas : Laboratoire F4

Annexes VI – Résultats expérimentaux - « Variante : Type de liant »

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,49%	0,76%	1,18%	1,56%	3,61%	6,87%	10,42%	18,51%	31,68%
	Ecart type	0,00%	0,13%	0,11%	0,09%	0,00%	0,28%	0,40%	0,45%	1,23%	2,61%
Dés.	Moyenne	6,43%	5,66%	6,56%		7,79%	9,00%	12,48%	15,63%		
	Ecart type	0,00%	0,32%	0,33%		0,37%	0,43%	0,57%	0,77%		
Δw		6,43%	5,17%	5,80%		6,23%	5,39%	5,62%	5,22%		

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,42%	0,81%	1,24%	1,38%	3,06%	6,46%	9,60%	17,09%	29,10%
	Ecart type	0,00%	0,36%	0,30%	0,30%	0,00%	0,25%	0,81%	0,70%	1,60%	3,49%
Dés.	Moyenne	5,21%	5,07%	5,97%		7,14%	8,19%	11,20%	14,24%		
	Ecart type	0,00%	0,72%	0,71%		0,70%	0,71%	0,73%	0,90%		
Δw		5,21%	4,66%	5,16%		5,77%	5,14%	4,74%	4,65%		

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,00%	0,28%	0,66%	1,07%	1,78%	4,67%	8,64%	17,44%	34,09%
	Ecart type	0,00%	0,00%	0,02%	0,03%	0,00%	0,07%	0,19%	0,82%	2,47%	6,15%
Dés.	Moyenne	2,92%	2,87%	3,70%		4,67%	5,60%	8,70%	12,35%		
	Ecart type	0,00%	0,30%	0,29%		0,32%	0,39%	0,66%	1,17%		
Δw		2,92%	2,87%	3,42%		3,60%	3,83%	4,04%	3,71%		

Tableau Annexe VI.2 Isotherme de sorption – teneur en eau obtenue par modélisation des cinétiques sur les formulations Variante « Taux de Liant »

Haut : Laboratoire F1 / Milieu : Laboratoire F3 / Bas : Laboratoire F4

VI.III Perméabilité à la vapeur

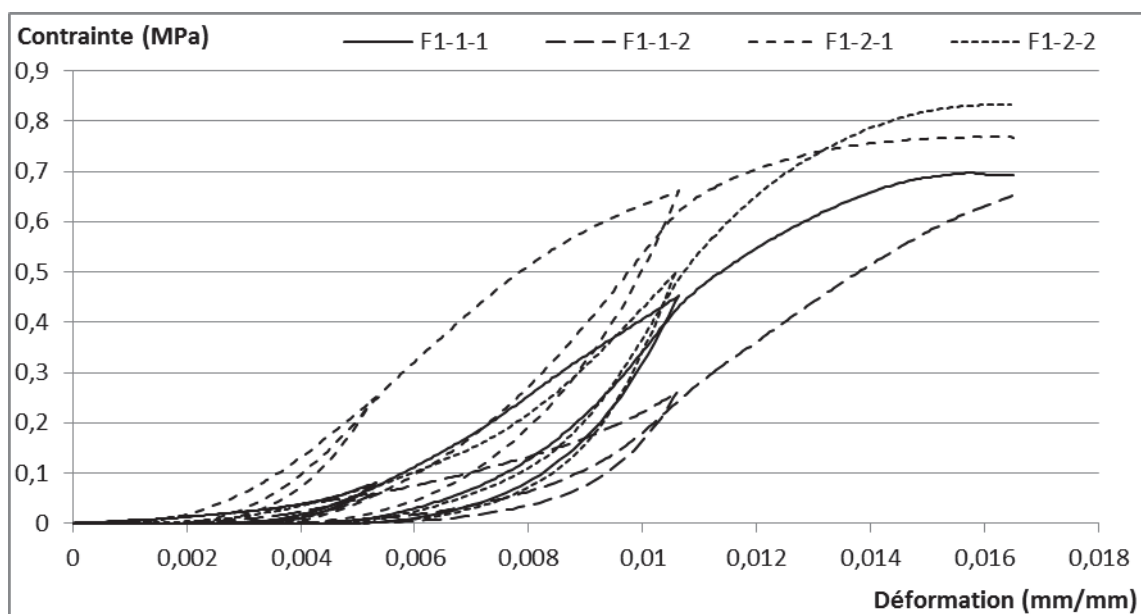
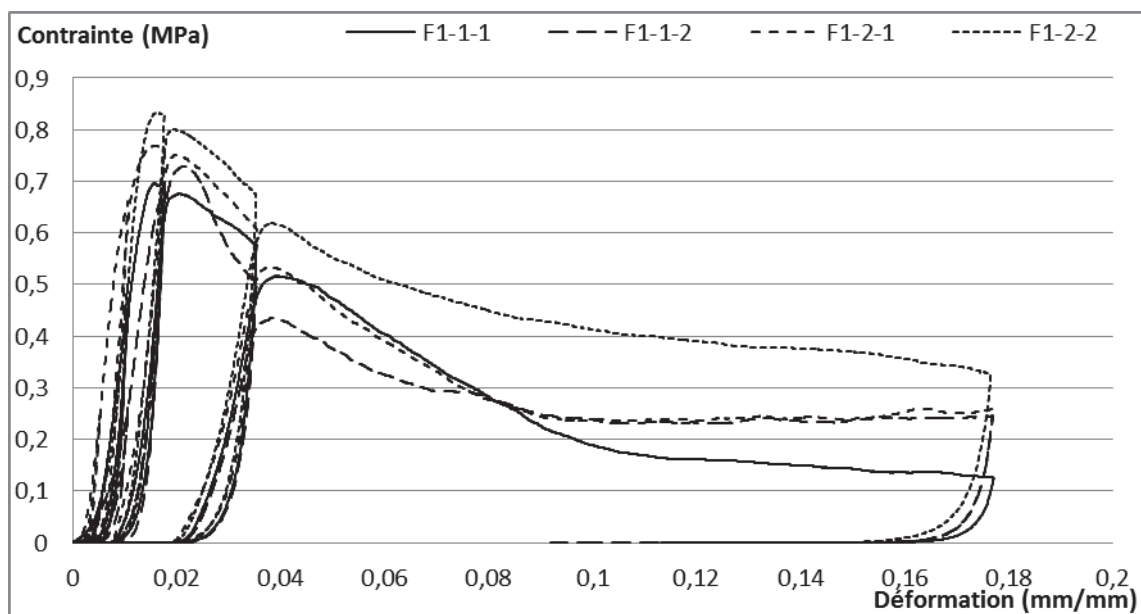
Hri	0	0	23	43	58	81	81
Hre	50	23	43	58	81	90	94
SI2C Référence	2,92	3,24	3,86	4,82	5,32	17,48	21,30
Labo F1	3,03	0,82	3,83	6,21	3,75	21,38	5,04
Labo F3	2,96	0,52	4,25	10,66	3,60	26,56	10,06
Labo F4	2,94	0,72	4,85	10,61	3,35	21,25	13,32

Tableau Annexe VI.3 Perméabilité à la vapeur d'eau ($\pi \times 10^{11}$) en fonction du couple d'humidité (HR_i ; HR_e)

VI.IV Propriétés mécaniques

Echantillon	ρ (kg.m ⁻³)	E _{externe} (MPa)	E _{interne} (MPa)	σ_{\max} (MPa)	$\varepsilon_{\sigma\max}$ (mm/mm)	$\sigma_{\varepsilon15\%}$ (MPa)
F1-1-1	425,51	73,53	119,05	0,70	0,02	0,14
F1-1-2	420,25	80,65	142,86	0,73	0,02	0,23
F1-2-1	436,04	111,11	142,86	0,77	0,02	0,24
F1-2-2	433,98	116,28	215,52	0,83	0,02	0,37

Tableau Annexe VI.4 Masse volumique apparente, Module de Young (Apparent et élastique) et Contraintes (Maximale et résiduelle) de la formulation F1 Non Carbonatée

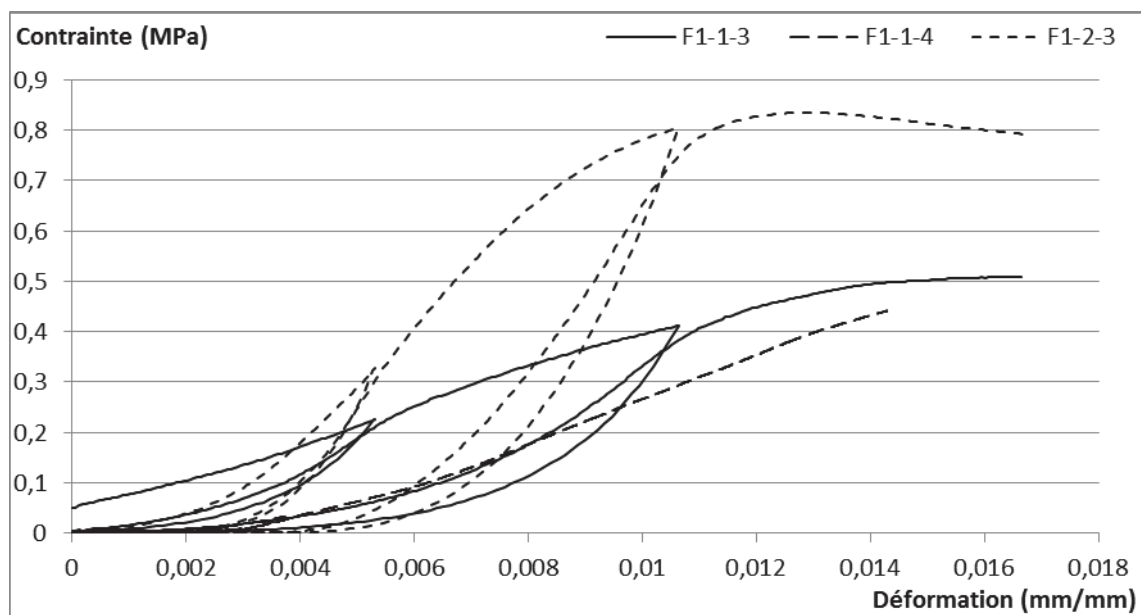
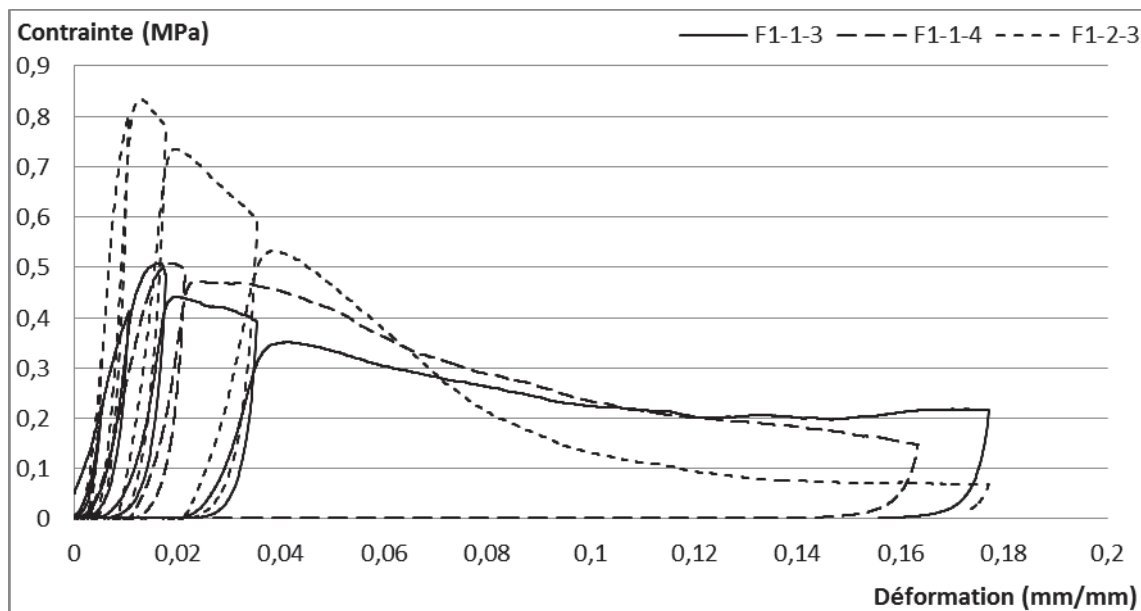


Annexe VI.2 Evolution de la contrainte en fonction de la déformation – Formulation F1 Non Carbonatée
Haut : Courbe complète / Bas : Zoom aux faibles déformations

Annexes VI – Résultats expérimentaux - « Variante : Type de liant »

Echantillon	ρ (kg.m ⁻³)	E _{externe} (MPa)	E _{interne} (MPa)	σ_{\max} (MPa)	$\varepsilon_{\sigma\max}$ (mm/mm)	$\sigma_{\varepsilon15\%}$ (MPa)
F1-1-3	141,37	37,88	78,13	0,51	0,02	0,20
F1-1-4	141,8	57,14	142,86	0,51	0,02	0,19
F1-2-3	141,91	125,00	156,25	0,83	0,01	0,07

Tableau Annexe VI.5 Masse volumique apparente, Module de Young (Apparent et élastique) et Contraintes (Maximale et résiduelle) de la formulation F1 Carbonatée

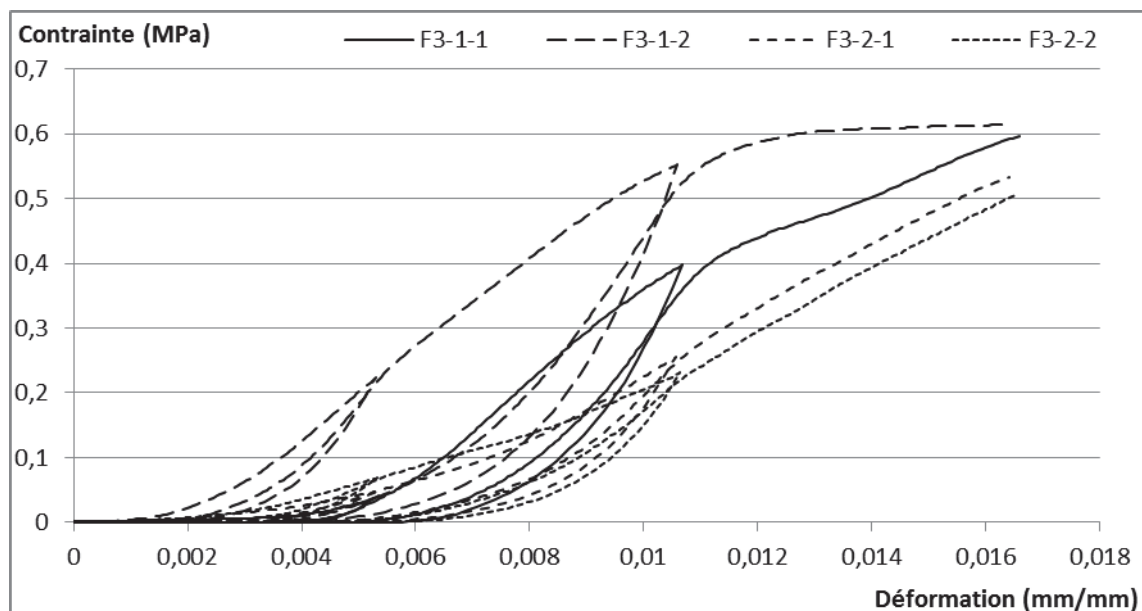
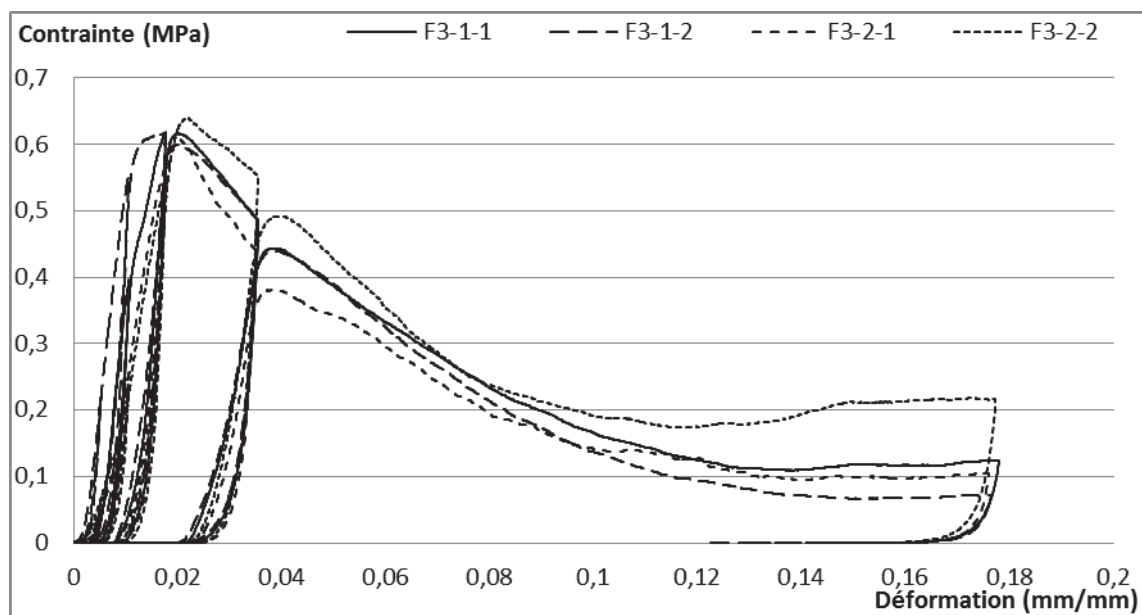


*Annexe VI.3 Evolution de la contrainte en fonction de la déformation – Formulation F1 Carbonatée
Haut : Courbe complète / Bas : Zoom aux faibles déformations*

Annexes VI – Résultats expérimentaux - « Variante : Type de liant »

Echantillon	ρ (kg.m ⁻³)	E _{externe} (MPa)	E _{interne} (MPa)	σ_{\max} (MPa)	$\varepsilon_{\sigma\max}$ (mm/mm)	$\sigma_{\varepsilon 15\%}$ (MPa)
F3-1-1	412,67	79,55	116,67	0,62	0,02	0,12
F3-1-2	406,71	72,58	136,36	0,62	0,02	0,10
F3-2-1	420,95	59,21	90,00	0,61	0,02	0,10
F3-2-2	420,94	75,00	115,38	0,64	0,02	0,10

Tableau Annexe VI.6 Masse volumique apparente, Module de Young (Apparent et élastique) et Contraintes (Maximale et résiduelle) de la formulation F3 Non Carbonatée

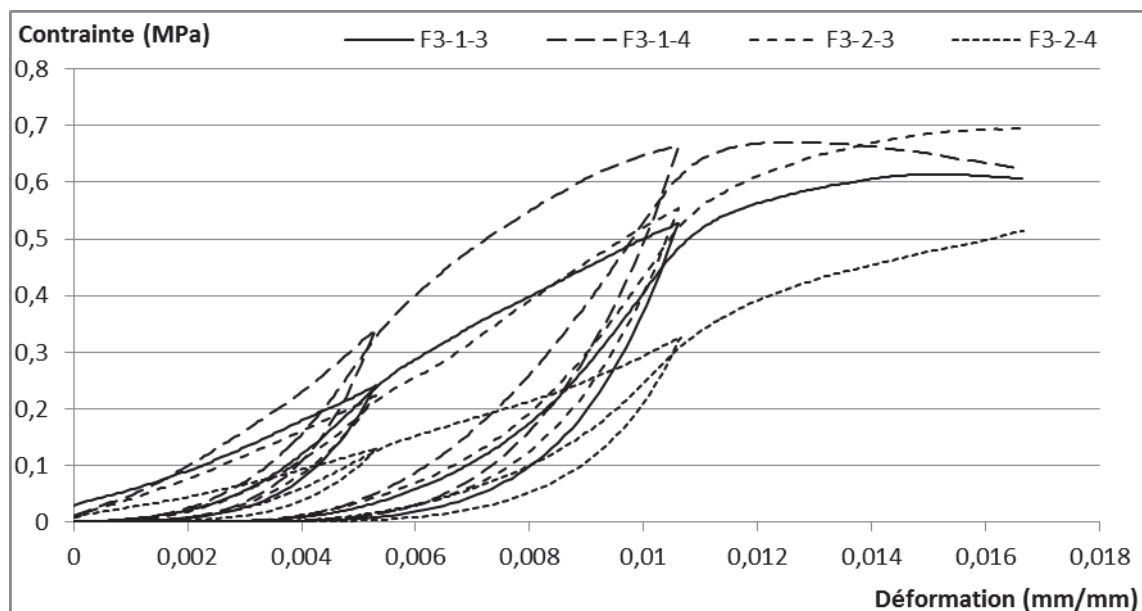
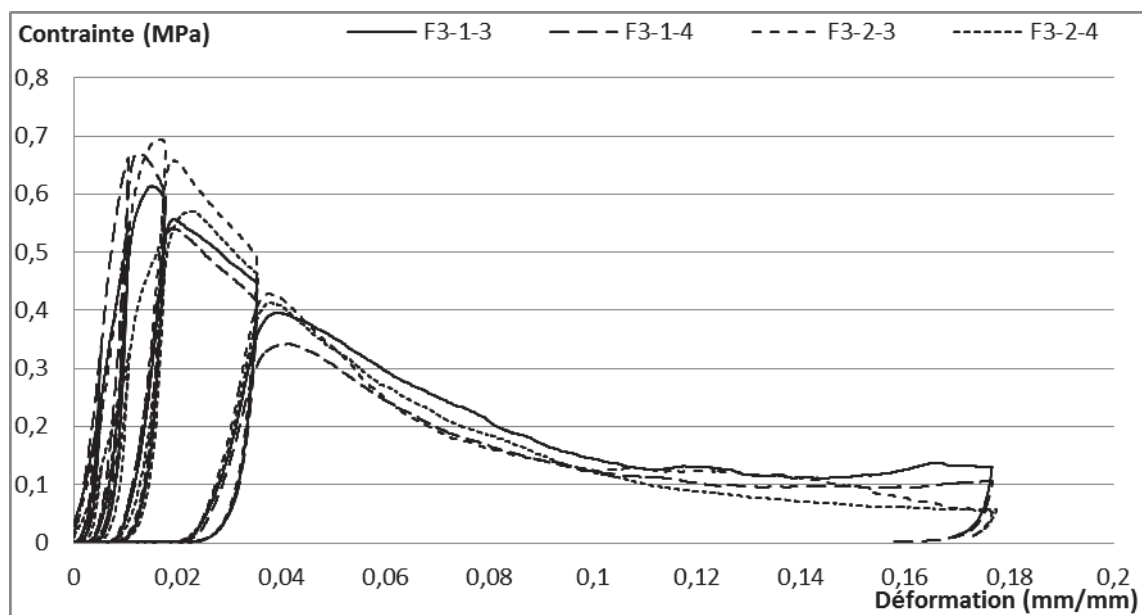


Annexe VI.4 Evolution de la contrainte en fonction de la déformation – Formulation F3 Non Carbonatée
Haut : Courbe complète / Bas : Zoom aux faibles déformations

Annexes VI – Résultats expérimentaux - « Variante : Type de liant »

Echantillon	ρ (kg.m ⁻³)	E _{externe} (MPa)	E _{interne} (MPa)	σ_{\max} (MPa)	$\varepsilon_{\sigma\max}$ (mm/mm)	$\sigma_{\varepsilon15\%}$ (MPa)
F3-1-3	415,69	53,57	80,36	0,61	0,01	0,11
F3-1-4	419,62	72,58	104,65	0,67	0,01	0,10
F3-2-3	426,07	67,16	75,00	0,69	0,02	0,10
F3-2-4	414,24	38,46	93,75	0,57	0,02	0,10

Tableau Annexe VI.7 Masse volumique apparente, Module de Young (Apparent et élastique) et Contraintes (Maximale et résiduelle) de la formulation F3 Carbonatée

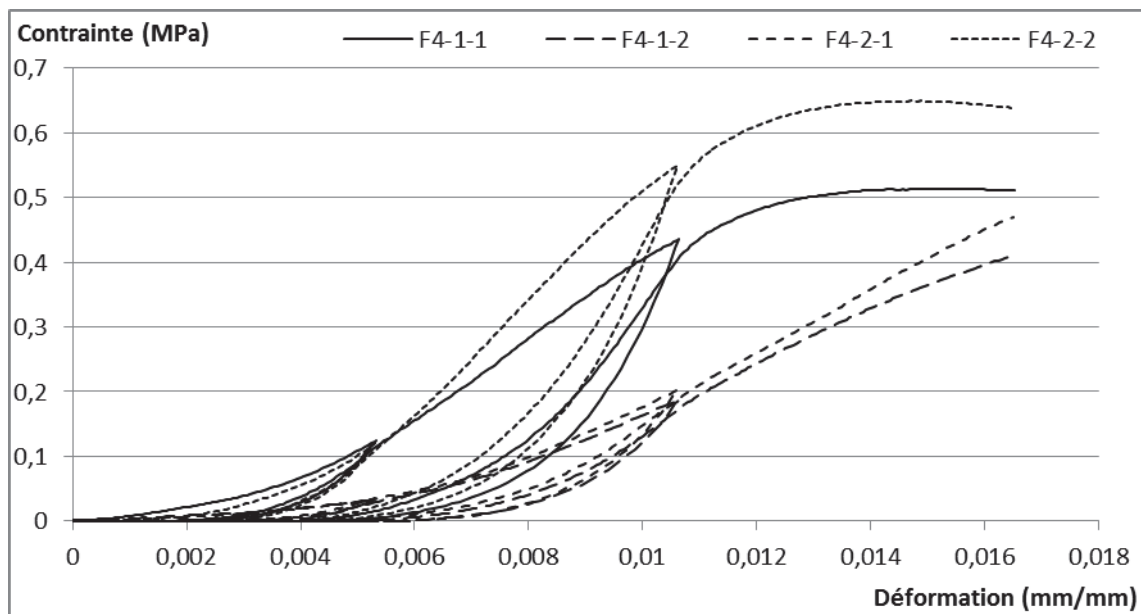
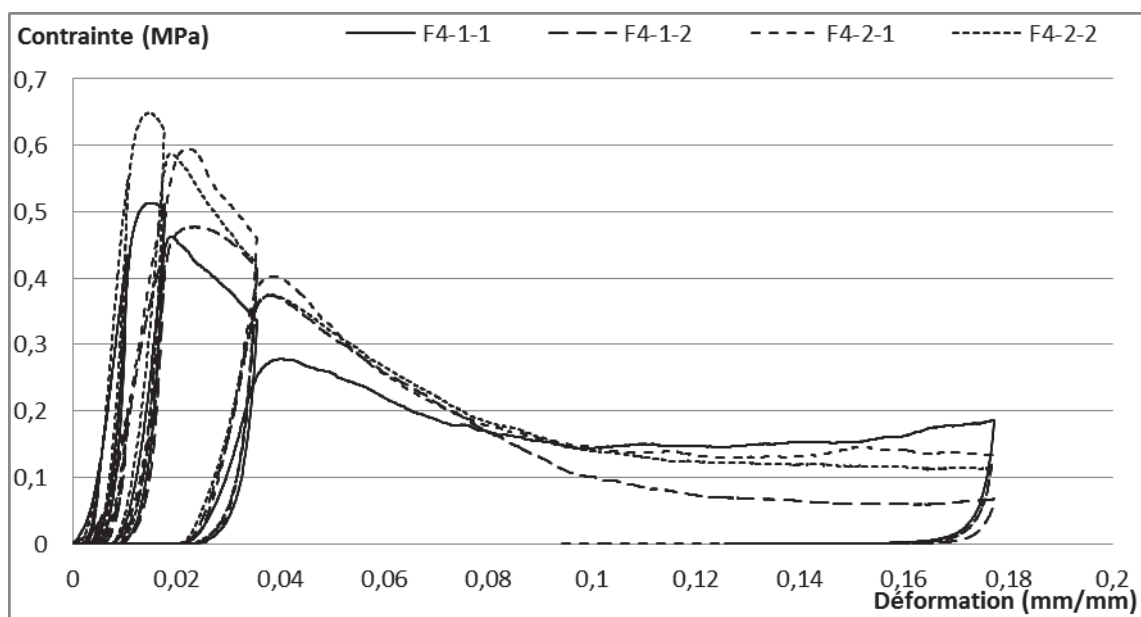


*Annexe VI.5 Evolution de la contrainte en fonction de la déformation – Formulation F3 Carbonatée
Haut : Courbe complète / Bas : Zoom aux faibles déformations*

Annexes VI – Résultats expérimentaux - « Variante : Type de liant »

Echantillon	ρ (kg.m ⁻³)	E _{externe} (MPa)	E _{interne} (MPa)	σ_{\max} (MPa)	$\varepsilon_{\sigma\max}$ (mm/mm)	$\sigma_{\varepsilon15\%}$ (MPa)
F4-1-1	403,07	63,38	128,57	0,51	0,02	0,15
F4-1-2	408,04	39,60	65,22	0,48	0,02	0,14
F4-2-1	413,60	47,37	59,21	0,60	0,02	0,14
F4-2-2	414,76	86,54	140,63	0,65	0,01	0,14

Tableau Annexe VI.8 Masse volumique apparente, Module de Young (Apparent et élastique) et Contraintes (Maximale et résiduelle) de la formulation F4 Non Carbonatée

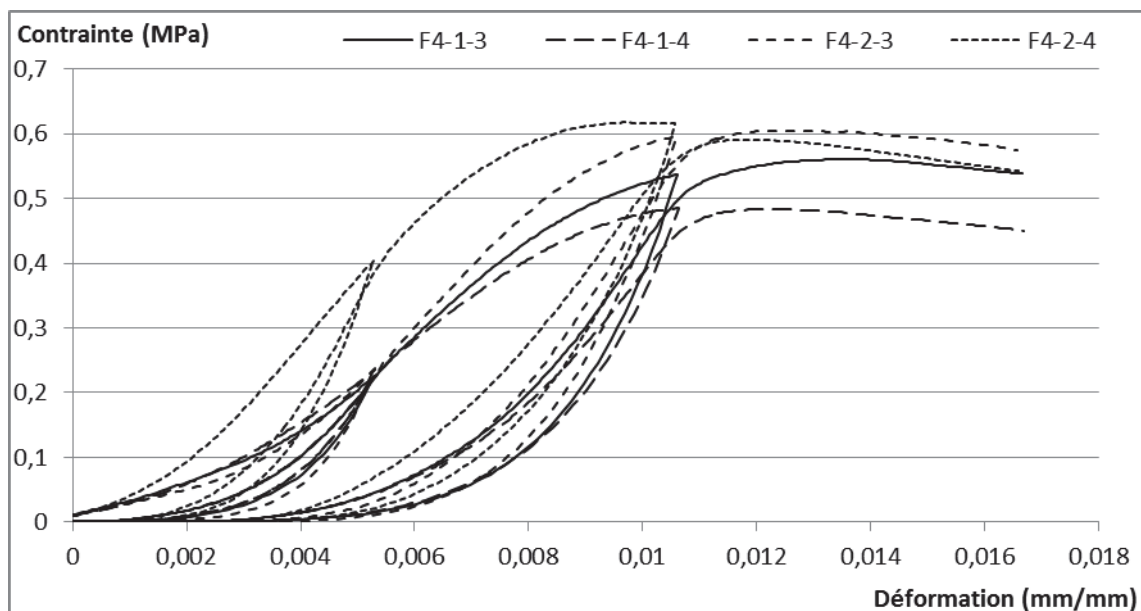
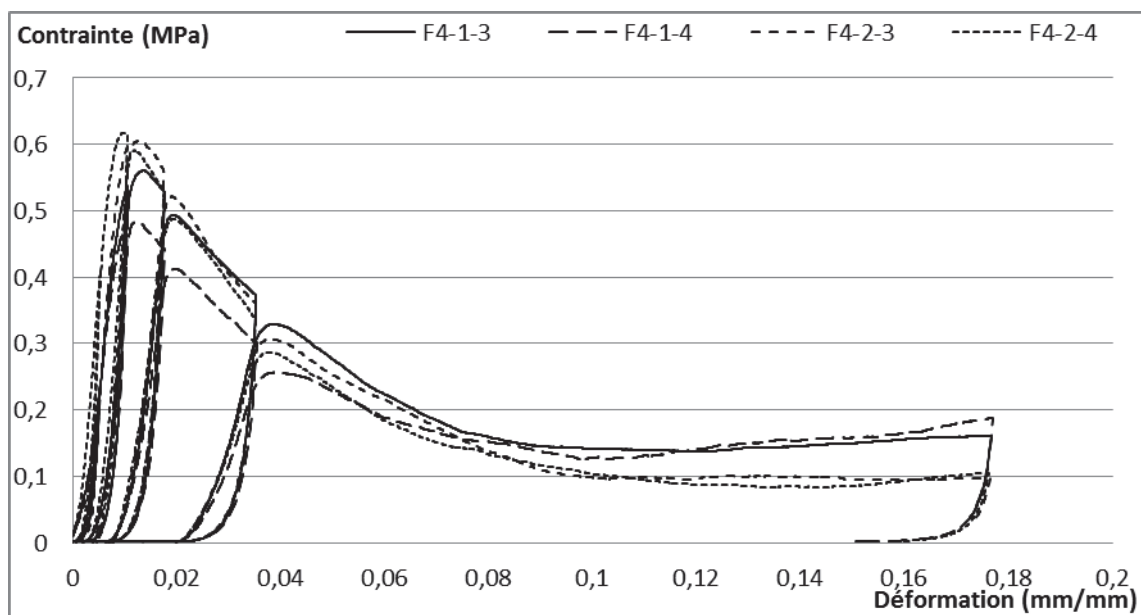


Annexe VI.6 Evolution de la contrainte en fonction de la déformation – Formulation F4 Non Carbonatée
Haut : Courbe complète / Bas : Zoom aux faibles déformations

Annexes VI – Résultats expérimentaux - « Variante : Type de liant »

Echantillon	ρ (kg.m ⁻³)	E _{externe} (MPa)	E _{interne} (MPa)	σ_{\max} (MPa)	$\varepsilon_{\sigma\max}$ (mm/mm)	$\sigma_{\varepsilon15\%}$ (MPa)
F4-1-3	409,92	72,58	125,00	0,56	0,01	0,15
F4-1-4	398,58	70,31	100,00	0,48	0,01	0,10
F4-2-3	408,79	107,14	132,35	0,60	0,01	0,09
F4-2-4	408,45	93,75	155,17	0,62	0,01	0,10

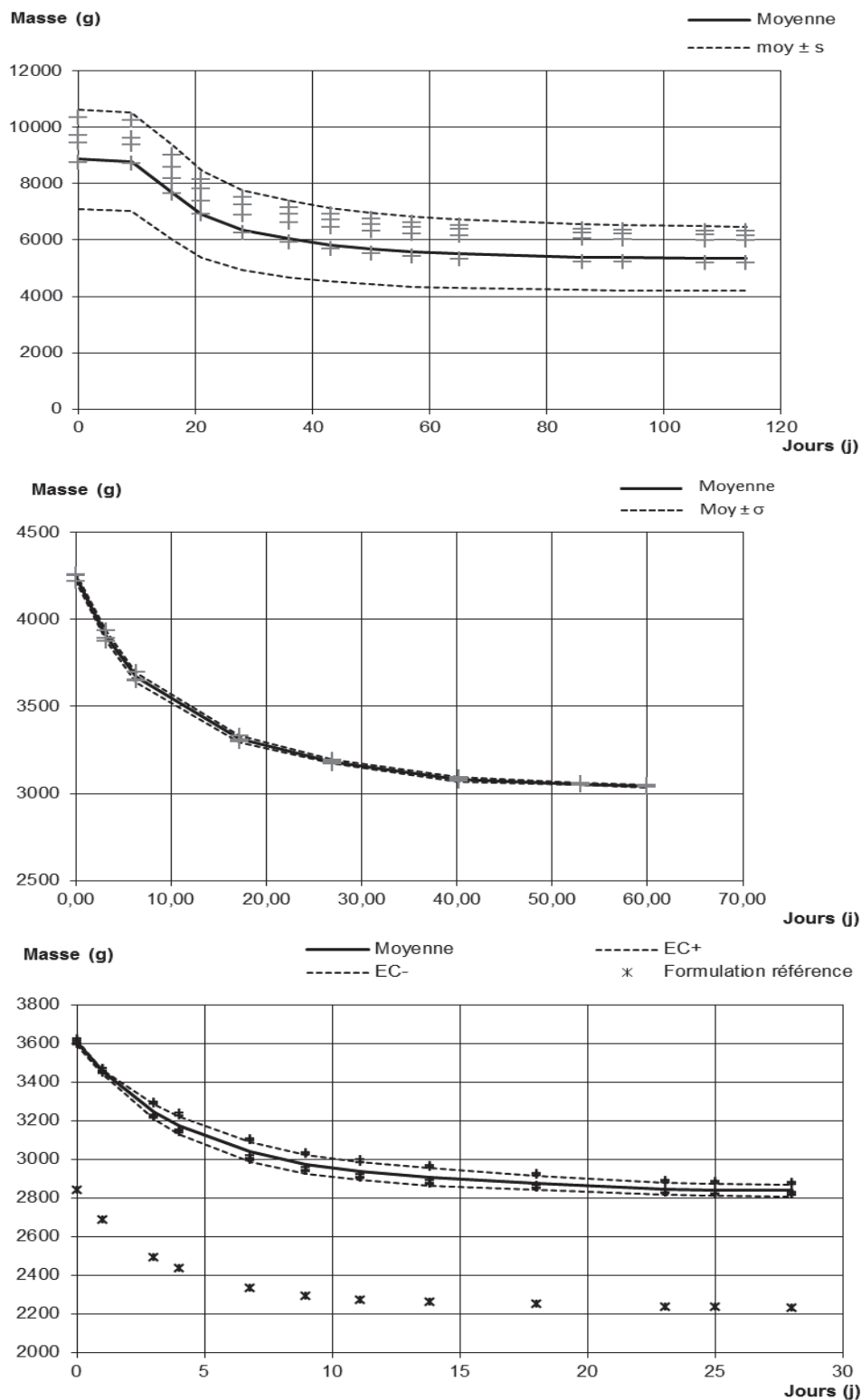
Tableau Annexe VI.9 Masse volumique apparente, Module de Young (Apparent et élastique) et Contraintes (Maximale et résiduelle) de la formulation F4 Carbonatée



Annexe VI.7 Evolution de la contrainte en fonction de la déformation – Formulation F4 Carbonatée
Haut : Courbe complète / Bas : Zoom aux faibles déformations

Annexe VII Résultats « Variante : Type de chanvre »

VII.I Cinétiques de séchage



Annexe VII.1 Evolution de la masse en fonction du temps
Haut : Terrachanvre Référence / Milieu : Laboratoire Formulation 2 / bas : Formulation Chanvre traité

VII.II Sorption

	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,006	0,004	0,005	0,014	0,025	0,028	0,046	0,077
	b			0,702	0,683	0,670	0,601	0,343	0,712	0,839	0,921
	c			-1,340	-1,063	-0,282	-0,046	-0,077	-0,155	-0,117	-0,065
	we			0,003	0,007	0,012	0,026	0,048	0,076	0,122	0,200
Désorption	a	0,004	-0,009	-0,014		-0,013	-0,028	-0,022	-0,077		
	b	0,928	0,779	0,704		0,639	0,348	0,534	0,634		
	c	-0,612	-0,118	-1,326		-0,475	-0,448	-0,381	-0,430		
	we	0,036	0,031	0,040		0,054	0,067	0,095	0,118		
	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,006	0,004	0,005	0,016	0,029	0,038	0,065	0,111
	b			0,171	0,469	0,558	0,624	0,309	0,613	0,852	0,949
	c			-0,723	-0,504	-0,216	-0,043	-0,127	-0,092	-0,108	-0,058
	we			0,008	0,012	0,016	0,033	0,060	0,096	0,159	0,269
Désorption	a	0,003	-0,009	-0,012		-0,011	-0,031	-0,028	-0,120		
	b	1,521	0,738	0,336		0,500	0,369	0,670	0,667		
	c	-0,548	-0,114	-0,601		-0,500	-0,585	-0,536	-0,337		
	we	0,043	0,047	0,055		0,067	0,078	0,110	0,138		
		HR [%]	0	23	43	58	81	94			
Adsorption	a		0,004	0,014	0,020	0,039	0,075				
	b		0,704	0,514	0,376	0,467	0,622				
	c		-0,206	-0,212	-0,223	-0,332	-0,163				
	we		0,004	0,014	0,020	0,039	0,075				

Tableau Annexe VII.1 Coefficient des paramètres des cinétiques

Haut : Terrachanvre Référence / Milieu : Laboratoire Formulation 2 / bas : Laboratoire Formulation Chanvre traité

Annexes VII – Résultats expérimentaux - « Variante : Type de chanvre »

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,21%	0,29%	0,70%	1,19%	2,59%	4,83%	7,63%	12,21%	19,99%
	Ecart type	0,00%	0,32%	0,20%	0,11%	0,09%	0,48%	0,29%	0,22%	1,23%	3,97%
Dés.	Moyenne	3,58%	3,11%	3,99%		5,38%	6,70%	9,53%	11,79%		
	Ecart type	0,44%	0,49%	0,47%		0,54%	0,60%	0,59%	0,41%		
Δw		3,58%	2,90%	3,70%		4,19%	4,11%	4,70%	4,16%		

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,42%	0,78%	1,16%	1,63%	3,30%	5,96%	9,56%	15,86%	26,94%
	Ecart type	0,00%	0,08%	0,09%	0,10%	0,00%	0,21%	0,15%	0,13%	0,37%	0,94%
Dés.	Moyenne	4,83%	4,68%	5,53%		6,71%	7,80%	10,97%	13,84%		
	Ecart type	0,00%	0,19%	0,20%		0,19%	0,18%	0,18%	0,21%		
Δw		4,83%	4,26%	4,76%		5,08%	4,49%	5,00%	4,27%		

Adsorption	HR [%]	0%	23%	43%	58%	81%	94%
	Moyenne	0,00%	0,40%	1,36%	1,99%	3,87%	7,54%
	Ecart type	0,00%	0,15%	0,30%	0,31%	0,17%	0,27%

Tableau Annexe VII.2 Isotherme de sorption – teneur en eau obtenue par modélisation des cinétiques sur les formulations Variante « Type de fibre »

Haut : Terrachanvre Référence / Milieu : Laboratoire Formulation 2 / bas : Laboratoire Formulation Chanvre traité

VII.III Perméabilité à la vapeur

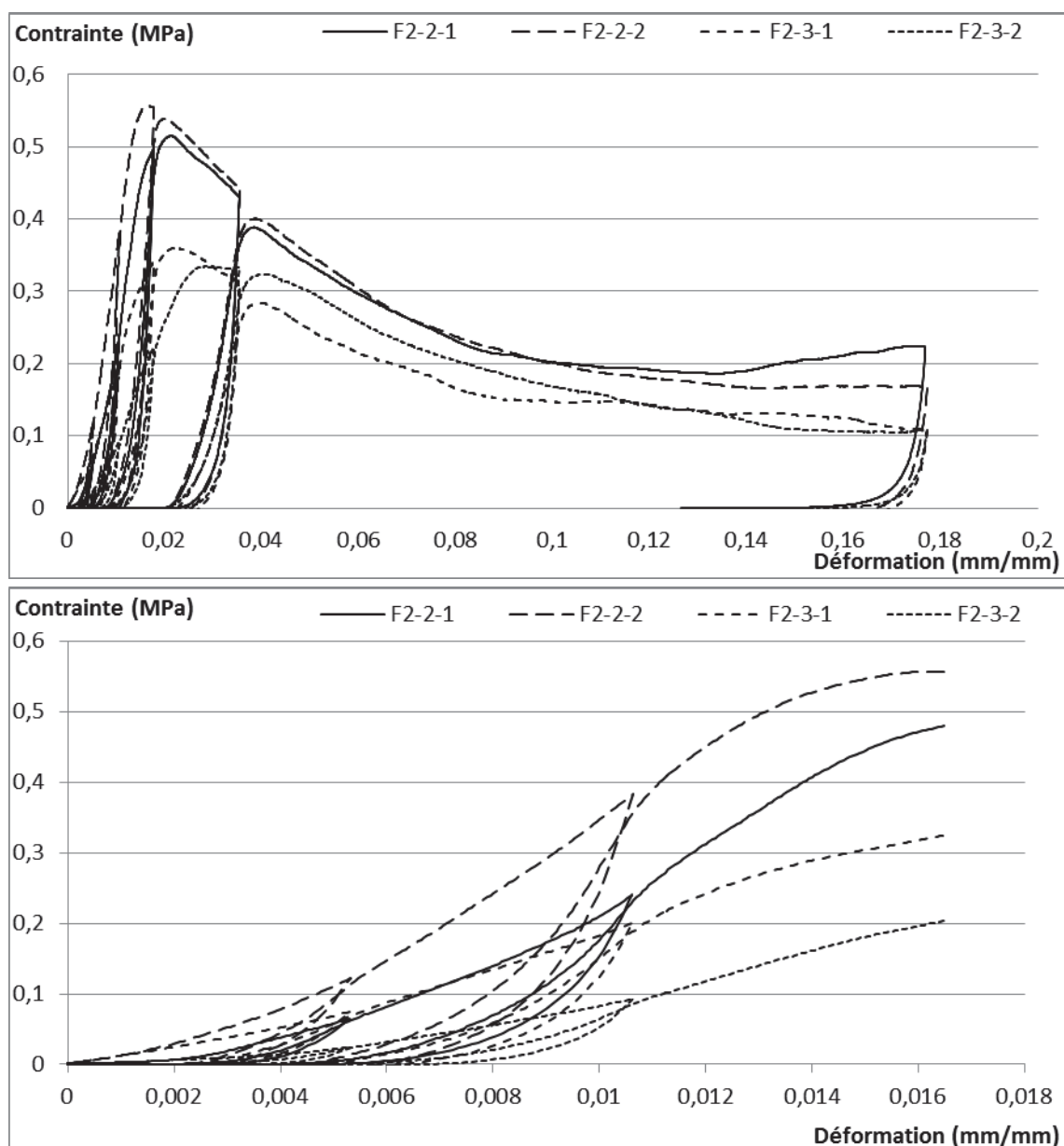
Hri	0	0	23	23	43	58	81	81
Hre	50	23	33	43	58	81	90	94
SI2C Référence	2,92	3,24	13,90	3,86	4,82	5,32	17,48	21,30
Ter. Ref.	3,15	5,36	2,32	8,44	4,79	5,59	10,45	37,23
Labo F2	3,08	3,29		4,15	5,17	3,72	11,34	
Labo F2C	3,26	0,75		5,04	9,35	4,33		
Labo BCT	2,46							

Tableau Annexe VII.3 Perméabilité à la vapeur d'eau ($\pi \times 10^{11}$) en fonction du couple d'humidité (HR_i ; HR_e)

VII.IV Propriétés mécaniques

Echantillon	ρ (kg.m ⁻³)	E _{externe} (MPa)	E _{interne} (MPa)	σ_{\max} (MPa)	$\varepsilon_{\sigma\max}$ (mm/mm)	$\sigma_{\varepsilon 15\%}$ (MPa)
F2-2-1	479,81	51,28	71,43	0,51	0,02	0,20
F2-2-2	482,74	50,00	115,38	0,56	0,02	0,17
F2-3-1	453,71	23,81	52,24	0,36	0,02	0,13
F2-3-2	460,43	12,82	27,27	0,33	0,03	0,11

Tableau Annexe VII.4 Masse volumique apparente, Module de Young (Apparent et élastique) et Contraintes (Maximale et résiduelle) de la formulation F2 Non Carbonatée

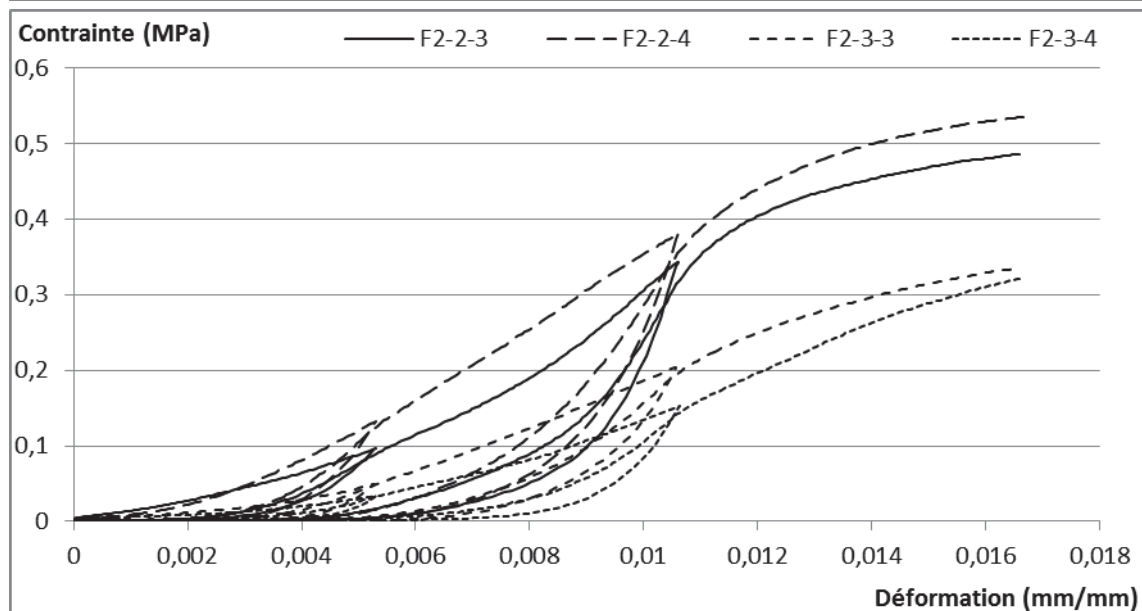
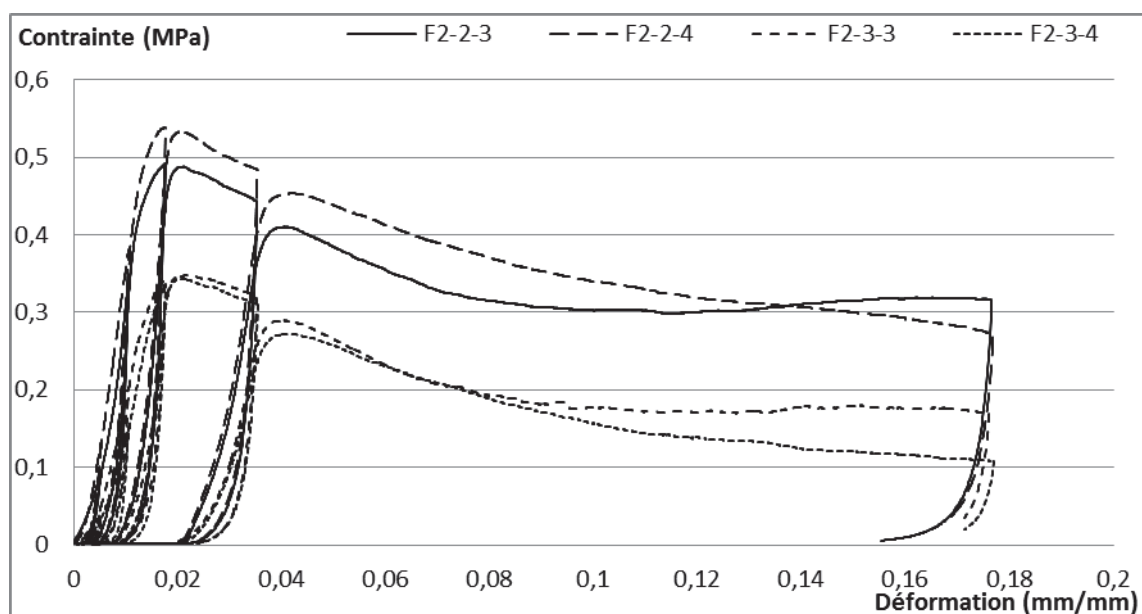


Annexe VII.2 Evolution de la contrainte en fonction de la déformation – Formulation F1 Non Carbonatée
Haut : Courbe complète / Bas : Zoom aux faibles déformations

Annexes VII – Résultats expérimentaux - « Variante : Type de chanvre »

Echantillon	ρ (kg.m ⁻³)	E _{externe} (MPa)	E _{interne} (MPa)	σ_{\max} (MPa)	$\varepsilon_{\sigma\max}$ (mm/mm)	$\sigma_{\varepsilon 15\%}$ (MPa)
F2-2-3	475,71	58,3333333	116,666667	0,49145466	0,0176659	0,31505984
F2-2-4	490,54	46,6666667	100	0,53934108	0,017611207	0,17904003
F2-3-3	464,27	28,0898876	60,9756098	0,34814455	0,024921239	0,17948357
F2-3-4	450,20	31,25	60,9756098	0,34388038	0,020323815	0,1789634

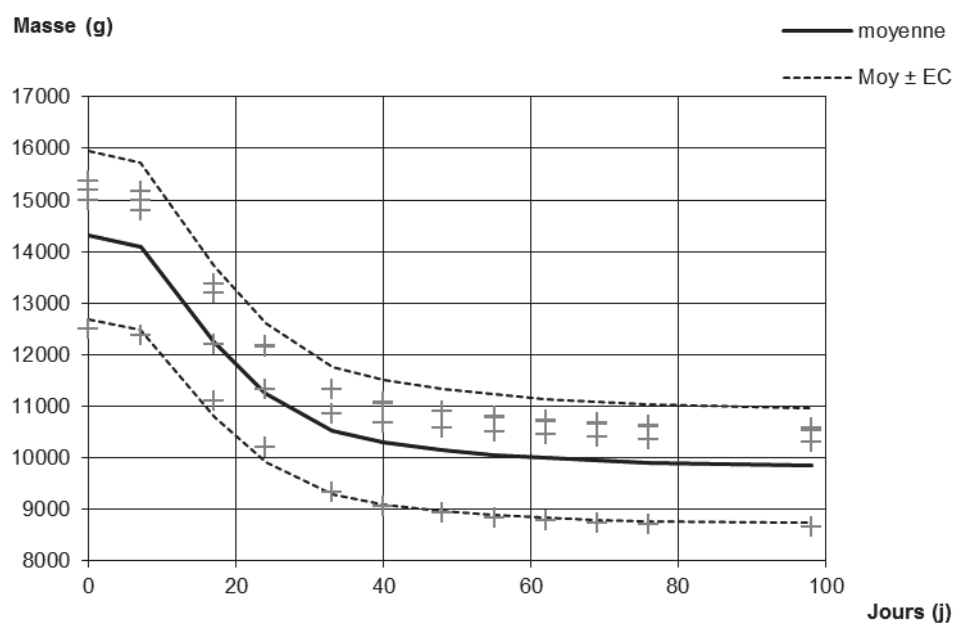
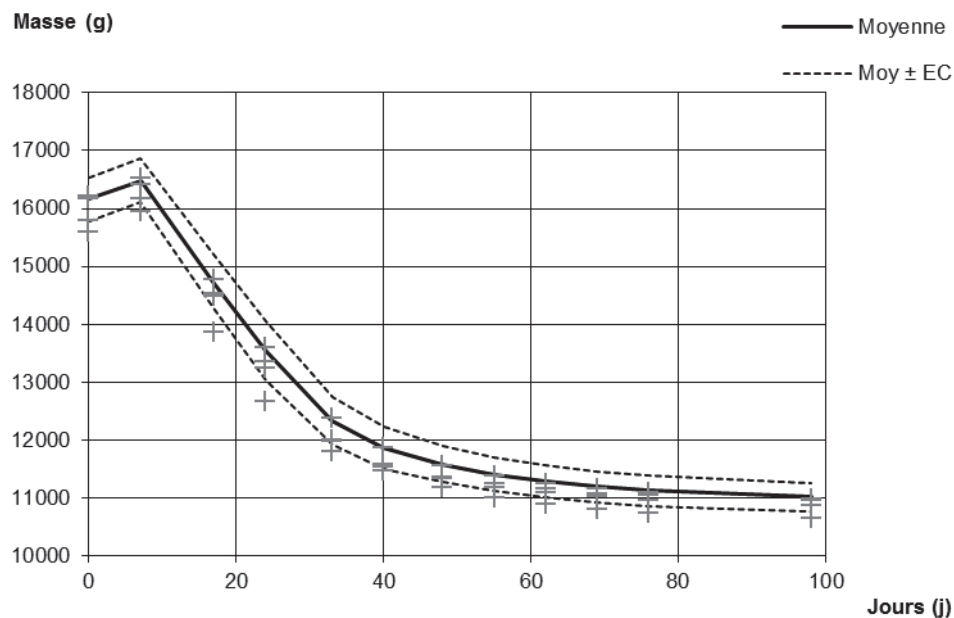
Tableau Annexe VII.5 Masse volumique apparente, Module de Young (Apparent et élastique) et Contraintes (Maximale et résiduelle) de la formulation F2 Carbonatée



Annexe VII.3 Evolution de la contrainte en fonction de la déformation – Formulation F1 Carbonatée
Haut : Courbe complète / Bas : Zoom aux faibles déformations

Annexe VIII Résultats « Liants et Enduits »

VIII.I Cinétiques de séchage



Annexe VIII.1 Evolution de la masse en fonction du temps
Haut : Enduit Chanvribat / Bas : Enduit Terrachanvre

VIII.II Sorption

	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,007	0,004	0,033	0,136	0,008	0,013	0,024	0,029
	b			0,691	0,634	0,920	0,975	0,427	0,725	0,813	0,902
	c			-0,231	-0,116	-0,041	-0,002	-0,559	-0,219	-0,147	-0,129
	we			0,007	0,011	0,043	0,153	0,035	0,048	0,073	0,102
Désorption	a	0,006	-0,002	-0,009		-0,007	-0,015	-0,010	-0,029		
	b	0,524	0,565	0,439		0,567	0,541	0,513	0,534		
	c	-1,767	-0,444	-0,511		-0,451	-0,454	-0,492	-0,476		
	we	0,035	0,029	0,030		0,040	0,047	0,063	0,073		
	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,004	0,008	0,007
	b			0,500	0,500	0,500	1,025	0,352	0,574	0,695	0,810
	c			-0,500	-0,500	-0,500	-0,956	-0,603	-0,399	-0,126	-0,125
	we			0,002	0,003	0,003	0,004	0,006	0,009	0,017	0,025
Désorption	a	0,000	-0,001	-0,003		-0,002	-0,005	-0,002	-0,004		
	b	0,500	0,530	0,500		0,500	0,500	0,546	0,822		
	c	-0,500	-0,470	-0,500		-0,500	-0,500	-0,451	-1,189		
	we	0,008	0,008	0,008		0,011	0,013	0,019	0,021		

Tableau Annexe VIII.1.4.1 Coefficient des paramètres des cinétiques
Haut : Liant Tradical PF70 / Bas : Liant Tradichanvre

Annexes VIII – Résultats expérimentaux - «Liants et Enduits»

	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,003	0,002	0,002	0,005	0,013	0,015	0,025	0,039
	b			0,880	1,061	1,041	0,579	0,391	0,715	0,821	0,924
	c			-1,143	-0,900	-0,932	-0,089	-0,068	-0,147	-0,119	-0,068
	we			0,004	0,005	0,007	0,013	0,026	0,041	0,066	0,105
Désorption	a	0,002	-0,003	-0,006		-0,007	-0,017	-0,011	-0,039		
	b	1,011	1,093	0,396		0,500	0,491	0,831	0,752		
	c	-0,972	-0,419	-0,570		-0,500	-0,505	-0,774	-0,395		
	we	0,021	0,020	0,022		0,029	0,036	0,053	0,064		

	HR [%]	0	11	23	33	43	58	81	90	95	97
Adsorption	a			0,003	0,002	0,002	0,003	0,012	0,014	0,023	0,041
	b			0,716	1,061	1,041	0,918	0,425	0,772	0,852	0,931
	c			-1,311	-0,900	-0,932	-0,623	-0,124	-0,173	-0,114	-0,051
	we			0,003	0,005	0,007	0,011	0,022	0,036	0,059	0,100
Désorption	a	0,002	-0,003	-0,006		-0,006	-0,015	-0,010	-0,038		
	b	1,053	0,996	0,597		0,678	0,495	0,875	0,832		
	c	-0,874	-0,366	-1,483		-0,553	-0,516	-0,613	-0,430		
	we	0,018	0,016	0,019		0,025	0,031	0,047	0,057		

*Tableau Annexe VIII.2 Coefficient des paramètres des cinétiques
Haut : Enduit Chanvribat / Bas : Enduit Terrachanvre*

Annexes VIII – Résultats expérimentaux - «Liants et Enduits»

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,00%	0,70%	1,10%	1,98%	2,49%	3,55%	4,76%	7,25%	10,15%
	Ecart type	0,00%	0,00%	0,07%	0,09%	0,00%	0,31%	0,39%	0,45%	0,45%	0,54%
Dés.	Moyenne	3,43%	2,85%	3,04%		3,97%	4,71%	6,29%	7,34%		
	Ecart type	0,46%	0,49%	0,48%		0,55%	0,62%	0,67%	0,63%		
Δw		3,43%	2,85%	2,34%		1,98%	2,21%	2,74%	2,58%		

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,12%	0,17%	0,26%	0,29%	0,41%	0,56%	0,91%	1,74%	2,46%
	Ecart type	0,00%	0,22%	0,20%	0,20%	0,21%	0,22%	0,22%	0,24%	0,24%	0,26%
Dés.	Moyenne	0,82%	0,77%	0,82%		1,08%	1,32%	1,86%	2,07%		
	Ecart type	0,25%	0,25%	0,25%		0,25%	0,25%	0,25%	0,25%		
Δw		0,82%	0,66%	0,65%		0,79%	0,92%	1,30%	1,16%		

*Tableau Annexe VIII.3 Résultats de la cinétique - Isotherme – Liant
Haut : Liant Tradical PF70 / Bas : Liant Tradichanvre*

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,14%	0,36%	0,52%	0,72%	1,26%	2,61%	4,07%	6,58%	10,48%
	Ecart type	0,00%	0,01%	0,02%	0,02%	0,02%	0,04%	0,18%	0,09%	0,15%	0,42%
Dés.	Moyenne	2,15%	1,97%	2,23%		2,90%	3,58%	5,32%	6,41%		
	Ecart type	0,12%	0,12%	0,12%		0,11%	0,09%	0,09%	0,10%		
Δw		2,15%	1,84%	1,87%		2,18%	2,32%	2,71%	2,34%		

	HR [%]	0%	11%	23%	33%	43%	58%	81%	90%	95%	97%
Ads.	Moyenne	0,00%	0,16%	0,34%	0,51%	0,70%	1,05%	2,23%	3,60%	5,94%	10,03%
	Ecart type	0,00%	0,05%	0,14%	0,15%	0,15%	0,15%	0,07%	0,05%	0,07%	0,30%
Dés.	Moyenne	1,80%	1,58%	1,88%		2,50%	3,15%	4,72%	5,71%		
	Ecart type	0,13%	0,13%	0,11%		0,11%	0,10%	0,08%	0,06%		
Δw		1,80%	1,42%	1,53%		1,80%	2,09%	2,49%	2,12%		

*Tableau Annexe VIII.4 Résultats de la cinétique - Isotherme – Enduit
Haut : Enduit Chanvribat / Bas : Enduit Terrachanvre*

VIII.III Perméabilité à la vapeur

Hri	0	0	23	23	43	58	81	81
Hre	50	23	33	43	58	81	90	94
SI2C Référence	2,92	3,24	13,90	3,86	4,82	5,32	17,48	21,30
Liant TR	2,90	2,26	4,80	2,84	2,12	3,14	4,96	4,69
Liant PF70	2,79	2,36	5,81	3,10	3,67	2,66	4,95	4,52
Enduit C.	2,64	3,22	6,71	4,03	4,45	5,37	-	-
Enduit T.	1,75	1,67	3,55	2,33	2,89	3,56	4,92	5,08

Tableau Annexe VIII.5 Perméabilité à la vapeur d'eau ($\pi \times 10^{-11}$) en fonction du couple d'humidité (HR_i ; HR_e)

AVIS DU JURY SUR LA REPRODUCTION DE LA THESE SOUTENUE

Titre de la thèse:

Optimisation des propriétés (physiques, hydriques et mécaniques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation

Nom Prénom de l'auteur : CHAMOIN JULIEN

Membres du jury :

- Monsieur GLOUANNEC Patrick
- Monsieur ARNAUD Laurent
- Monsieur LANOS Christophe
- Madame COLLET Florence
- Madame PRETOT Sylvie
- Monsieur SALAGNAC Patrick

Président du jury : SALAGNAC Patrick

Date de la soutenance : 04 Juillet 2013

Reproduction de la these soutenue

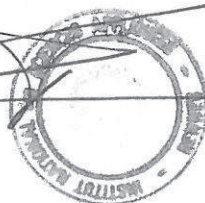
- ☒ Thèse pouvant être reproduite en l'état
☐ Thèse pouvant être reproduite après corrections suggérées

Fait à Rennes, le 04 Juillet 2013

Signature du président de jury

Le Directeur,

M'hamed DRISSI



A handwritten signature in black ink, likely belonging to Patrick Salagnac, the president of the jury.

Résumé

Les bâtiments affectent fortement l'environnement à travers les consommations d'énergies et de ressources naturelles. Afin de limiter ces impacts, l'intégration de matériaux bio-sourcés dans la construction, tels que béton de chanvre, apparaît comme une solution pertinente. Les composites à base de chanvre présentent en outre un comportement hygrothermique spécifique conduisant à limiter les besoins énergétiques du bâtiment tout en assurant un bon niveau de confort ressenti. Ce type de matériau non porteur est utilisé en remplissage pour différentes applications (Mur, Dalle, Toit) et en enduit isolant. Cette thèse vient en appui du projet ANR « BetonChanvre » visant à optimiser la formulation de tels mélanges en liaison avec les process de fabrication des partenaires industriels et à caractériser les matériaux élaborés.

Différents types de chanvre (fibré ou non, traité hydrofuge) et différents liants (chaux, sulfate de calcium) sont utilisés. Les formulations proposées dérivent de formulations de référence produites par les partenaires industriels.

Les caractéristiques physiques des différents composites étudiés (masse volumique apparente, masse volumique réelle, porosité ouverte et totale) sont mesurées. Les propriétés hydriques sont quantifiées en régime permanent via la mesure des isothermes de sorption (adsorption/désorption) et de la perméabilité à la vapeur. Les isothermes de sorption sont mesurées selon la méthode discontinue par paliers successifs d'humidité relative croissante puis décroissante. La perméabilité à la vapeur est mesurée selon la méthode de la coupelle. Différents couples d'hygrométrie sont testés pour évaluer l'évolution de la perméabilité en fonction de la teneur en eau. La diffusivité hydrique est calculée à partir de la modélisation des isothermes de sorption et de la perméabilité à la vapeur. Enfin la caractérisation des performances mécaniques repose sur l'identification de la résistance à la compression, des modules de déformation (apparent et élastique) et de la contrainte résiduelle pour une déformation à 15%. L'impact du phénomène de vieillissement/carbonatation sur les caractéristiques hydriques et mécaniques est évalué sur des échantillons carbonatés en incubateur CO₂.

L'interprétation des résultats permet d'identifier différents principes de formulation en lien avec les performances hydriques et mécaniques finales ciblées pour le composite. Il en ressort que c'est l'association du liant avec le chanvre qui permet d'assurer des performances optimales. Toutefois, les optimum vis à vis des réponses hydrique et mécanique ne sont pas concordants.

Abstract

Buildings strongly affect environment through energy and raw consumption. In order to reduce these impacts, the use of bio-based building materials, like hempconcrete appears as a relevant solution. Hemp based composites lead to specific hygrothermal behavior limiting energy needs of buildings and insuring a good felt comfort level. These non load bearing materials are used as filling material for various applications (Wall, Floor, Roof) and as insulating rendering. This PhD Thesis supports the ANR project « BetonChanvre » and concerns the optimization of the formulation in link with manufacturing process of the industrial partners and the characterization of these materials.

Several kinds of hemp shiv (with and without fibers, with water repellant treatment) and of binders (lime, calcium sulfate) are used. The proposed formulation derives from reference formulations given by industrial partners.

The physical characteristics of the studied materials (apparent density, bulk density, total and open porosity) are measured. The hydric properties are quantified under steady-state through sorption isotherms (adsorption/desorption) and water vapor permeability. The sorption curves are measured following the discontinuous method at successive stages of increasing, and then decreasing, relative humidity. The water vapour permeability is measured with the cup method. Several sets of relative humidities are considered in order to study the variation of permeability versus humidity. The hydric diffusivity is calculated from the fitting of the sorption curve and of the water vapor permeability. Finally, the characterization of mechanical performances is given from the compression strength, from the strain modulus (apparent and elastic) and from the residual strength for 15% of strain. The impact of ageing and carbonation on hydric and mechanical characteristics is estimated on specimens carbonated with CO₂ incubator.

The data treatment allows identifying several formulations rules for such kind of bio-based composite, in link with the expected hydric and mechanical performances. Results highlight that only the mix of shiv with mineral binder allows to reach the optimal performances. Despite, the formulations for mechanical or hydric optimum don't met.